



SS/~~WS~~ 20.12./.....

Praktikum: (~~X~~/P2) (~~X~~/~~Di~~/~~X~~/~~X~~) Gruppe-Nr: ...11...

Name: ..... Fleig ..... Vorname: ..... Georg .....

Name: ..... Krause ..... Vorname: ..... Marcel .....

Versuch: ..... Vakuum ..... (~~X~~/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: ..... Lukas Pfaffmann ..... Durchgeführt am: 19.06.12.

Abgabe am: 26.06.12

Rückgabe am: .....

Begründung:

2. Abgabe am: .....

Ergebnis: (+10/-1)

Fehlerrechnung: ja/nein

Datum: 02.07.12

Handzeichen: PF

Bemerkungen:

Musterprotokoll ?

**Versuch P2-41,42,44**

**Vakuum**

**Raum F1-19**

Dieser Versuch bietet einen Einblick in die für den Experimentalphysiker oft so wichtige Vakuumtechnik. Sie spielt eine wesentliche Rolle zum Beispiel in der Nanophysik, aber auch bei Großexperimenten wie KATRIN im Campus Nord oder dem LHC am CERN. Ein anderes Anwendungsbeispiel wäre die Dünnschichttechnik, mit welcher z.B. luftdichte Oberflächen in Chipstüten aufgedampft werden.

Sie lernen Prinzipien der Vakuumerzeugung und der Vakuummessung (Messung kleiner Drücke) kennen, gewinnen Erfahrung mit der Handhabung einer Vakuumapparatur und - meist unvermeidlich - auch mit den praktischen Schwierigkeiten. Bei der Beschäftigung mit Wärmeleitungsmanometer, Gasentladung, Aufdampfversuch und Leitwertbestimmung haben Sie gute Gelegenheit, die Bedeutung der **'mittleren freien Weglänge'** kennen zu lernen. Die Funktionsprinzipien von Drehschieberpumpe, Turbomolekularpumpe, Wärmeleitungsmanometer und Ionisationsmanometer sollten Ihnen schon zu Beginn des Versuchs klar sein.

**Hinweise:**

**Obwohl in diesem Versuch eine splittergeschützte Glasglocke verwendet wird, kann die evakuierte Glasglocke implodieren. Zum Schutz der Augen muss deshalb beim Arbeiten an der evakuierten Apparatur eine Schutzbrille getragen werden!**

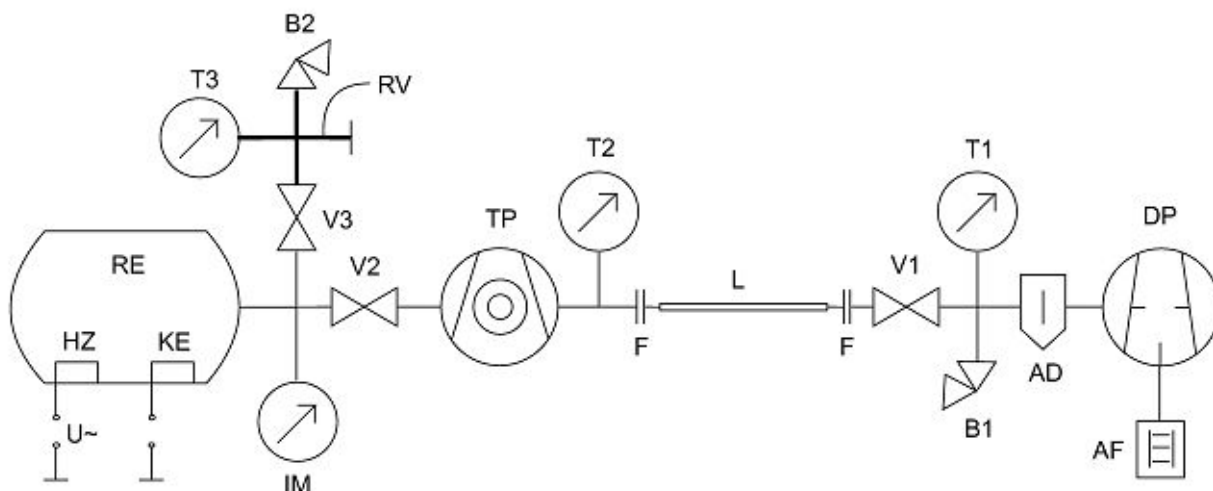
**Die hier aufgebaute Apparatur ist sehr empfindlich. Bei fehlerhafter Handhabung können teure Schäden entstehen, weshalb die einzelnen Versuchsteile nur nach Rücksprache mit dem Betreuer gestartet werden dürfen!**

Beim Arbeiten am Rezipienteninneren (Verdampferschiffchen laden, Glas putzen etc.) soll die Pumpenöffnung mit der bereitliegenden Plastikkappe abgedeckt werden. Vor dem Verbinden von Bauteilen mit Hilfe von Dichtungsringen müssen die Ringe und die Dichtflächen sorgfältig gereinigt werden.

Die Turbomolekularpumpe darf nur bei einem Vorvakuumdruck von besser als  $10^{-1}$  mbar eingeschaltet werden.

Die Apparatur darf erst dann belüftet werden, wenn nach Abschalten der Turbomolekularpumpe deren **Rotor völlig zum Stillstand gekommen ist!** Das dauert einige Minuten! Ein Lufteinbruch bei rotierender Pumpe zerstört diese. Extreme Vorsicht!

**Skizze der Apparatur:**



DP Drehschieberpumpe; AF Auspuff-Filter; (AD Adsorptionsfalle); T1, T2, T3 Wärmeleitvakuummeter (Thermovac-Meßsonde); B1, B2 Belüftungsventil; V1, V2, V3 Vakuumventil; L austauschbare Verbindungsleitung; TP Turbomolekularpumpe (TURBOVAC); IM Ionisationsvakuummeter (Penning-Transmitter); RE Rezipient; RV Referenzvolumen; HZ wechselstrombeheiztes Verdampferschiffchen; KE mit Hochspannung versorgte Kugelelektroden.

## Aufgaben:

In der Regel finden Sie die Apparatur unter Vorvakuum vor, das Aufdampfschiffchen mit Indium bestückt und die Glasglocke gereinigt von alten Aufdampfbelägen. Dann sollten Sie sich zunächst einen **Überblick über die Apparaturen verschaffen**, indem Sie die Leitungen verfolgen und die verwendeten Bauteile lokalisieren. Beachten Sie die Hinweise auf diesem Aufgabenblatt und schalten Sie die Apparatur nicht ohne den Betreuer ein! Die drei Versuchsaufbauten sind fast gleich; Apparatur 44 ist als einzige mit der Gasentladungsröhre für den Demoversuch ausgestattet, dafür fehlt hier die Möglichkeit der Messung der Überschlagsfestigkeit (Aufg. 6).

### 1. Demoversuch (für alle an Apparatur 44 vorhanden)

**Beobachten, skizzieren und beschreiben Sie die Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck.** Evakuieren Sie den Rezipienten und die Gasentladungsröhre gemeinsam (Ventile V1 und V2 offen) **mit Hilfe der Drehschieberpumpe**, die Turbomolekularpumpe bleibt ausgeschaltet. Dabei ist das Hochspannungsgerät (U=) eingeschaltet. Erniedrigen Sie den Druck bis die Gasentladung erlischt. Schließen Sie nach dieser Aufgabe das Ventil V2 zur Gasentladungsröhre für alle folgenden Aufgaben. (Warum wohl?)

**2. Bestimmen Sie den Leitwert eines Metallrohres.** Wechseln Sie die Verbindungsleitung L (bisher Metall-Wellschlauch mit großem Querschnitt) gegen das etwa gleichlange Rohr mit ~2mm Innendurchmesser aus. Nehmen Sie "gleichzeitig" den zeitlichen Verlauf des Druckes an beiden Messstellen T1 und T2 auf. Diskutieren Sie Ihr Ergebnis.

Schalten Sie nach der Messreihe die Drehschieberpumpe wieder ab, belüften Sie den Rezipienten und tauschen Sie das 2mm-Rohr wieder gegen den Metall-Wellschlauch aus.

**3. Bestimmen Sie das Druckabhängige Saugvermögen S(p) der Drehschieberpumpe.** Evakuieren Sie dazu wieder die Apparatur mit Hilfe der Drehschieberpumpe. Nehmen Sie hierbei den zeitlichen Verlauf des Druckes p am Saugstutzen der Drehschieberpumpe auf (Messintervall zunächst so kurz wie möglich und später 15s). Verwenden Sie hierzu die Thermovac-Messsonde T1 und die Stoppuhr. Zeichnen Sie ein Diagramm S(p). Bestimmen Sie aus dem linearen Bereich des Kurvenverlaufs das mittlere Saugvermögen  $\bar{S}$ . Schalten Sie nach der Messung die Drehschieberpumpe ab.

**4. Bestimmen Sie mit Hilfe der Ionivac-Messröhre das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe.** Da die Turbomolekularpumpe bis zur vollen Saugleistung eine Anlaufzeit von ca. 60s benötigt, sollte sie nicht erst bei sehr niedrigen Drücken eingeschaltet werden. Die Apparatur muss also vor diesem Versuchsteil bis zu einem Druck von ca.  $2 \cdot 10^{-1}$  mbar teilbelüftet werden. Evakuieren Sie die Apparatur anschließend erneut mit der Drehschieberpumpe. Schalten Sie dann bei einem Druck von ca.  $8 \cdot 10^{-2}$  mbar die Turbomolekularpumpe ein und lesen Sie den Druck der Ionivac-Messröhre ab. Bestimmen Sie das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe analog zu Aufgabe 4 (Messintervall 10s). Beachten Sie die Hinweise des Betreuers bzgl. der Turbomolekularpumpe und diskutieren Sie den physikalischen Hintergrund. Schätzen Sie ab, mit welcher Kraft die Glasglocke auf die Gummidichtung gedrückt wird. Überlegen Sie sich was an dieser Glasglocke besonders sein muss.

**5. Führen Sie ein einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren durch.** Bei einer statischen Expansion wird das Boyle-Mariottesche Gesetz eingesetzt. Mit Hilfe dieses Verfahrens könnten z.B. Druckmessgeräte kalibriert werden.

Zunächst soll das Ventil V3 geschlossen werden und der Rezipient mit Hilfe der Drehschieberpumpe und anschließend mit der Turbomolekularpumpe evakuiert werden. Bei einem Druck von  $p < 10^{-4}$  mbar wird dann das Ventil V2 geschlossen und somit der Rezipient vom Rest der Apparatur getrennt. Die beiden Pumpen können ausgeschaltet werden. Öffnen Sie nun das Ventil V3 und lesen an der Messstelle T3 den sich einstellenden Gesamtdruck ab. Schließen sie anschließend wieder V3 und öffnen B2 damit sich in dem kleineren Referenzvolumen erneut Atmosphärendruck einstellt. Schließen Sie B2 und öffnen dann wieder V3 um eine erneute Expansion durchzuführen. Wiederholen Sie diesen Vorgang solange bis sich im Rezipienten ein Gesamtdruck von ca. 80mbar einstellt.

Skizzieren Sie den Druckverlauf und den Iterationszuwachs und bestimmen Sie das Expansionsverhältnis dieses Expansionssystems.

**6. Bestimmen Sie die elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum.** (Kann nur an den Apparaturen 41 und 42 durchgeführt werden.) Die Turbomolekularpumpe ist ausgeschaltet und die Drehschieberpumpe läuft. Das Vakuum wird zunächst lediglich mit V1 geregelt.

Messen Sie die Überschlagsspannung zwischen zwei Metallkugeln in Abhängigkeit vom Druck. Beginnen Sie bei Atmosphärendruck (1000 mbar), erhöhen Sie die Spannung bis zur Entladung und evakuieren Sie die Apparatur anschließend mit der Drehschieberpumpe bis zu einem Druck von ca. 500 mbar. Schließen Sie V1 um den erreichten Druck zu halten und erhöhen sie wieder die Spannung bis zur Entladung. Evakuieren Sie weiter bis zur Hälfte des vorherigen Drucks und wiederholen Sie diese Vorgehensweise bis Sie einen Druck von ca. 0,05 mbar erreicht haben. In diesem Druckbereich wird es immer schwieriger den Druck konstant zu halten.

Um leichter und schneller an weitere Messwerte zu kommen, evakuieren Sie nun zusätzlich und ohne Unterbrechung mit der Turbomolekularpumpe bis zu einem Druck von ungefähr  $2 \cdot 10^{-4}$  mbar. Schalten Sie die Turbomolekularpumpe aus und schließen Sie V2. Der Druck steigt nun von alleine. Nehmen Sie sobald wie möglich ( $U \leq 9$  kV) weitere Messwerte auf. Die Messreihe endet, wenn ein Druck von 0,05mbar erreicht ist.

Diskutieren Sie warum sich der Druck ab einem bestimmten Druckbereich nicht mehr genau einstellen lässt und warum er bei sehr kleinen Drücken kontinuierlich sinkt.

Beschreiben, skizzieren und diskutieren Sie das Ergebnis der Messung und die Art des Funkenüberschlags in den unterschiedlichen Druckbereichen. Sehen Sie Parallelen zum Demoversuch? Welche Folgen haben diese Ergebnisse für die Industrie?

**7. Dampfen Sie bei drei verschiedenen Drücken jeweils eine Indium-Schicht durch eine Kreisblende auf eine schwenkbare Plexiglasscheibe auf.** Es soll jeweils ein Fleck bei einem Druck von  $p \leq 10^{-5}$  mbar,  $p \approx 10^{-3}$  mbar und  $p \approx 10^{-2}$  mbar aufgedampft werden. Beobachten Sie hierbei auch den benötigten Heizstrom und diskutieren Sie die Randschärfe der aufgedampften Flecken.

**Achtung: Auch hier ist es wichtig zu wissen, was man tut: lokalisieren Sie zunächst das Tantal-Verdampferschiffchen im Rezipienten. Die Heizleitung reicht aus es vollständig zu zerstören!** Der Heizstrom darf erst hochgedreht werden, wenn das Sollvakuum erreicht ist. Beobachten Sie beim Hochdrehen das Verdampferschiffchen. Es soll glühen, aber nicht schmelzen!

**8. Bereiten Sie die Apparatur für die Nachfolger vor.** Belüften Sie die Apparatur, reinigen Sie die Plexiglasscheibe und die Glasglocke von den Aufdampfbelägen, bestücken Sie das Aufdampfschiffchen mit etwas Indium (Menge von Betreuer überprüfen lassen) und setzen Sie die Glocke wieder auf den Dichtungsring. Anschließend evakuieren Sie die Apparatur mit der Drehschieberpumpe.

#### **Umrechnungen:**

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2;$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm} \approx 0,981 \text{ bar};$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 760 \text{ mm Hg} \approx 1013 \text{ mbar}$$

#### **Volumenangaben:**

Referenzvolumen (bei allen Apparaturen gleich): **0,034 liter**

Volumina der drei Rezipienten (bis V2, V3 und IM): (App41- **10.1**; App42- **10.0**; App44- **9.2**) **liter**

die Volumina der Gesamtapparaturen sind jeweils um 0.5 liter größer

(Hinweis: Die Glasglocken dürfen nicht vertauscht werden)

#### **Stichworte:**

Rotierende Pumpen (Drehschieberpumpe), Turbomolekularpumpe, Diffusionspumpe, Kryopumpe, Saugvermögen, Saugleistung, Kontinuumsströmung (laminar, turbulent), Molekularströmung, Strömungswiderstand bzw. Leitwert, mittlere freie Weglänge in Abhängigkeit vom Druck, Leckrate, Lecksuche, Membranmanometer, U-Rohr-Manometer, Wärmeleitungsmanometer, Ionisationsmanometer, Penning-Manometer, Gasgesetze, Partialdruck, Dampfdruck, Boyle-Mariottesches Gesetz.

**Zubehör:**

Zweistufige **Drehschieberpumpe** (DP) TRIVAC D2,5E mit vakuumseitiger Adsorptionsfalle (AD) und ausgangsseitigem Auspuff-Filter (AF), Nennsaugvermögen 2,5 m<sup>3</sup>/h [App44: 1,6 m<sup>3</sup>/h];

Drei **Wärmeleitungsmanometer**-Sonden (T1,T2,T3) THERMOVAC Transmitter TTR91, Messbereich 5·10<sup>-4</sup> mbar bis 1 bar;

**Ionisationsmanometer**-Messsonde (IM) Penning-Transmitter PTR225, Messbereich 1·10<sup>-9</sup> – 1·10<sup>-2</sup>mbar;

**Transmittercontroller** DISPLAY THREE, = Elektronisches Vakuum-Druckmessgerät, Anzeigebereich 1·10<sup>-9</sup> – 2000 mbar, 3-Kanalgerät;

**Turbomolekularpumpe** (TP) TURBOVAC 50, Saugvermögen ≥ 30 l/s, Flanschdurchmesser Vorvakuumseite 16 mm, Hochvakuumseite 65 mm, Drehfrequenz max. 7200 min<sup>-1</sup>, Hochlaufzeit ca. 2 min;

**Steuergerät** TURBOTRONIK NT10 [NT50] für das kontrollierte Hochlaufen der Turbomolekularpumpe mit Start-/Stop-Tasten und Frequenzwandler für den Pumpenantriebsmotor (200 bis 1250 Hz), Anzeigelämpchen für ACCELERation / NORMALzustand / FAIL (fehlerhafter Zustand);

**Rezipient** (RE), Glasglocke auf Metallteller mit Gummidichtung, Nennmaße ~250 mm Höhe, ~220 mm Durchmesser;

**Verdampferschiffchen** (HZ) im Rezipienten, elektrisch direkt heizbar, mit Abschirmung und Lochblende und einer von außen schwenkbaren Plexiglasplatte (vorgesehen zum Aufdampfen von Indiumflecken)

Netzgerät für 6V~ und 50 A für den Strom durch das Verdampferschiffchen;

**Kugelelektroden** (KG) im Rezipienten, elektrisch aufladbar

HV-Netzgerät für 0...10kV mit Digital-Multimeter WAVETEX-Meterman 85XT um die Spannung beim Funkenüberschlag abzulesen (mit zwischengeschaltetem Widerstand R<sub>i</sub>=10MΩ, Anzeige also U/10);

**Stoppuhr, Schutzbrillen,**

**Schutzkappe** zum Abdecken der Turbomolekularpumpe, wenn die Glasglocke abgenommen ist;

**Metallwellschläuche:** Länge x Durchmesser: (App41- **510x28**; App42- **440x21**; App44- **530x23**) mm<sup>2</sup>

**Dünnes Metallrohr:** Durchmesser = 2mm bzw. 8mm

**Literatur:**

Wutz: Handbuch Vakuumtechnik

Edelmann: Vakuumphysik und -Technik

W. Pupp/H.K. Hartmann: Vakuumtechnik

Diels, Jaeckel : Leybold-Vakuumtaschenbuch

Allgemeine Lehrbücher der Physik

# **Physikalisches Anfängerpraktikum P2**

**Versuch:  
P2-41,42,44  
Vakuum**

Schriftliche Vorbereitung

von

Georg Fleig (georg@leech.it)  
Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:

19.06.12

# Theoretische Grundlagen

Es sollen zunächst die theoretischen Grundlagen für die Versuchsreihe zum Vakuum zusammengetragen werden. Dabei sollen insbesondere die verschiedenen, verwendeten Gerätschaften vorgestellt werden.

## Thermische Zustandsgleichung idealer Gase

Die thermische Zustandsgleichung idealer Gase, häufig vereinfacht als ideales Gasgesetz bezeichnet, beschreibt den Zusammenhang verschiedener Zustandsgrößen eines thermodynamischen Systems, welches aus einem als ideal angenommenen Gas besteht. Die Gleichung lautet:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1)$$

Dabei bezeichnen  $p$  den Druck,  $V$  das Volumen,  $n$  die Stoffmenge und  $T$  die Temperatur des Gases,  $R$  ist die universelle Gaskonstante mit  $R = 8,3144621(75) \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ .

## Boyle-Mariottesches Gesetz

Das Boyle-Mariottesche Gesetz ist eine Folgerung aus den Aussagen des idealen Gasgesetzes. Betrachtet man in (1) eine isotherme Zustandsänderung, also eine Zustandsänderung, bei der die Temperatur  $T$  konstant bleiben soll, und nimmt weiterhin eine konstante Stoffmenge  $n$  an, so findet man dort:

$$p \cdot V = \text{const} \Leftrightarrow p \propto \frac{1}{V}$$

Erhöht man also den Druck auf eine Gasmenge bei konstanter Temperatur, so nimmt das Volumen umgekehrt proportional zum Druck ab. Daraus folgt direkt, dass für zwei verschiedene Zustände der Drücke  $p_i$  und der Volumina  $V_i$  gilt:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

## Begriff des Vakuums

Als Vakuum (vom Lateinischen „vacuus“ - leer) bezeichnet man in den Naturwissenschaften in der Regel einen weitestgehend leeren Raum. Physikalisch spricht man von einem Vakuum, wenn ein Gas in einem evakuierten Behälter einen sehr viel geringeren Druck, und somit auch eine sehr viel geringere Teilchendichte, als das den Behälter umgebende Fluid besitzt. Je nach im evakuierten Behälter vorliegendem Druck unterscheidet man auch verschiedene Arten von Vakua:

- Grobvakuum (FV):  $300 - 10^0$  mbar
- Feinvakuum (FV):  $10^0 - 10^{-3}$  mbar
- Hochvakuum (HV):  $10^{-3} - 10^{-7}$  mbar
- Ultrahochvakuum (UHV):  $10^{-7} - 10^{-14}$  mbar

## Arten der Gasentladung

Man bezeichnet im Allgemeinen alle physikalischen Vorgänge, in denen ein Strom durch ein Gas fließt, als Gasentladung. Grundlage ist hierbei stets die Ausbildung eines Plasmas, sodass sich im Gas eine

zumindest teilweise Auftrennung von Ionen und Elektronen vorfindet. Dadurch wird das Gas leitend für elektrische Ströme. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Gasentladungsarten, die beiden nachfolgenden sind dabei die am häufigsten vorkommenden.

### **Glimmentladung**

Die Glimmentladung tritt häufig in Gasen niedrigen Drucks auf. Sie verursacht ein Glimmen mit einer für das Gas charakteristischen Farbe. Die Stromdichte auf den Elektroden, welche die Glimmentladung verursachen, ist häufig sehr gering, weshalb diese auch während der Entladung relativ kalt bleiben. Zwischen den einzelnen Elektroden findet sich dafür eine teilweise sehr hohe Spannung vor. Die Glimmentladung geht häufig einer Bogenentladung voraus.

### **Bogenentladung**

Die Bogenentladung hingegen ist ein der Glimmentladung sehr gegensätzlicher Effekt, der in mittleren bis hohen, teilweise nach vorangegangener Glimmentladung auch in niedrigen Druckbereichen auftreten kann. Charakteristisch für diese Art der Gasentladung ist ein heller Lichtbogen, der sich, je nach Abstand der Elektroden, willkürlich durch das Gas bewegen kann.

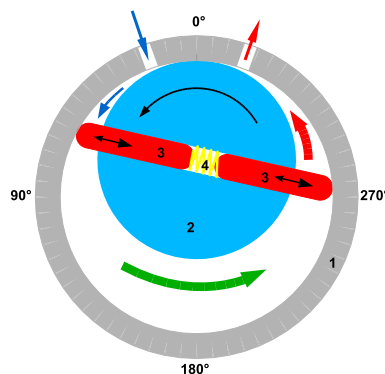
Im Gegensatz zur Glimmentladung ist die Stromdichte an den Elektroden extrem hoch, wodurch sich nicht nur die Elektroden, sondern auch das Gas bereits nach kurzer Zeit stark aufheizen. Daher eignet sich diese Art der Gasentladung auch für Schweißarbeiten. Der Spannungsabfall zwischen den Elektroden ist hier jedoch wesentlich geringer.

## **Vakuumpumpen**

Es gibt in der Vakuumtechnik eine große Anzahl verschiedener Pumpen zur effizienten Erzeugung von Vakua. Nachfolgend sind drei Pumpentypen näher beschrieben, von denen zwei Praktikum zur Anwendung kommen.

### **Drehschieberpumpe**

Eine Drehschieberpumpe, auch Flügelzellenpumpe genannt, gehört zu den Verdrängertypen. Sie ist sowohl für die Saug- als auch für die Druckerbeit von Flüssigkeiten und Gasen geeignet. Die Bauart variiert zwar je nach Verwendungszweck, nachfolgend ist jedoch der prinzipielle Aufbau jeder Drehschieberpumpe dargestellt.



Die Drehschieber (3) werden durch die Kraft der Feder (4) nach außen beschleunigt. Dadurch befinden sie sich stets so nah wie möglich am zylinderförmigen Stator (1). Nach einer vollständigen Umdrehung



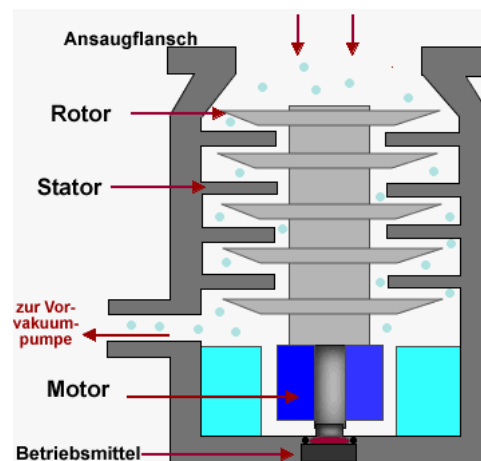
des Rotors finden so zweimal Ansaugvorgänge (blau) sowie Auslassvorgänge (rot) der sich durch die Pumpe bewegenden Fluide statt.

Nach dem obigen, einfachen Prinzip sind einige handelsübliche Vakuumpumpen aufgebaut. Die Vorteile dieser Bauart bestehen vor allem in den niedrigen Herstellungskosten und der großen Effizienz. Nachteilig ist hingegen, dass der Verschleiß von Drehschieberpumpen verhältnismäßig hoch ist, weswegen große Mengen an Schmiermittel verwendet werden müssen. Dies gewährleistet außerdem, dass die Pumpe möglichst dicht abschließt.

Die Drehschieberpumpe wird häufig als Vorstufe zur Erzeugung eines Hochvakuums genutzt. Mit ihr lassen sich Vakua von Umgebungsdruck ausgehend bis etwa  $10^{-2}$  mbar einstellen. Zur anschließenden, weiteren Evakuierung bietet sich beispielsweise die Verwendung von Turbomolekularpumpen an.

### Turbomolekularpumpe

Die Turbomolekularpumpe ist eine Weiterentwicklung der gewöhnlichen Molekularpumpen. Eine solche Pumpe ist schematisch nachfolgend skizziert.



Die Moleküle des zu transportierenden Gases werden von den schnell rotierenden Rotorschaukeln durch Adhäsionskräfte zunächst aufgenommen und später wieder abgestoßen. Dabei erhalten sie durch die im Vergleich zur Drehachse der Pumpe geneigten Oberflächen des Rotors einen Impulsbeitrag in Achsrichtung. Die Frequenzen des Rotors reichen von 36000 bis zu 72000 Umdrehungen pro Minute. Dadurch ist der zusätzliche Geschwindigkeitsbetrag in Achsrichtung in Größenordnung von der mittleren thermischen Geschwindigkeit  $\bar{c}$  der Teilchen:

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

Dabei bezeichnen  $T$  die Temperatur und  $M$  die molare Masse der Teilchen sowie  $R$  die universelle Gaskonstante. Es ist an dieser Gleichung, aber auch durch logische Überlegung, ersichtlich, dass die Pumpwirkung für Teilchen hoher molarer Masse wesentlich effektiver ist als für solche mit geringer molarer Masse. Beispielsweise lässt sich Wasserstoff mit vielen Arten von Molekularpumpen sehr viel schlechter aus einem Rezipienten pumpen als die restlichen Bestandteile der Luft.

Für den korrekten Betrieb der Pumpe ist stets ein gewisses Vorvakuum erforderlich, dessen Größenordnung von der Art der Pumpe abhängt. Im Allgemeinen sollte das Vorvakuum so groß sein, dass die mittlere freie Weglänge den Abstand zwischen den einzelnen Rotorblättern sowie den Abstand zwischen Rotor und Stator übersteigt. Damit wird nicht nur die korrekte Pumpwirkung garantiert, es wird gleichzeitig auch verhindert, dass die Pumpe durch zu große Hitzeentwicklung aufgrund starker Reibung der

Teilchen zerstört wird.

Aufgrund des Vorvakuums ergeben sich für Turbomolekularpumpen Vakua zwischen  $10^{-2}$  mbar bis  $10^{-7}$  mbar, die man mit ihnen erzeugen kann. Aufgrund ihrer Bauart sind diese Pumpen verhältnismäßig teuer und empfindlich, allerdings haben sie eine hohe Effizienz und ein großes Saugvermögen.

### **Kryopumpe**

Bei der Kryopumpe handelt es sich um keine Pumpe im eigentlichen Sinne, denn es findet kein echter Pumpvorgang statt. Im einfachsten Fall bestehen Kryopumpen aus einem Gehäuse, welches mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird. Das Fluid des Rezipienten wird durch die Kryopumpe derart abgekühlt, dass es an den Wänden kondensiert und eventuell sogar in eine feste Phase übergeht. Dadurch wird der Rezipient durch die Kühlung evakuiert.

Mit Hilfe einer Kryopumpe lassen sich Hochvakua im Bereich von  $10^{-3}$  mbar bis  $10^{-7}$  mbar einstellen. Die Pumpe zeichnet sich durch hervorragende Effizienz und Wartungsfreundlichkeit aus, hat allerdings den Nachteil, dass man damit nur Fluide evakuieren kann, deren Kondensationstemperatur oberhalb der Temperatur des Kühlmittels liegt.

### **Manometer**

Als Manometer bezeichnet man zusammenfassend alle Messgeräte, die in der Lage sind, den physikalischen Druck eines Fluids anzuzeigen. Wie bei den Pumpen gibt es auch hier eine Vielzahl verschiedenster Bauformen, von denen nachfolgend nur die zwei im Praktikum zur Verwendung kommenden besprochen werden sollen. Diese eignen sich besonders für die im Versuch auftretenden Druckbereiche.

#### **Wärmeleitungsmanometer**

Das Wärmeleitungsmanometer, auch Pirani-Messröhre genannt, eignet sich gut für Druckbereiche von  $10^{-4}$  mbar bis 1000 mbar. Es besteht aus einer Messröhre, die mit dem zu untersuchenden Gas gefüllt werden kann. Innerhalb dieser Messröhre befindet sich ein dünner Metalldraht, der ein Teil einer Wheatstone-Brücke darstellt. Man regelt nun den Widerstand der Wheatstone-Brücke so, dass die Temperatur des Heizdrahts unabhängig von der Wärmeabgabe stets konstant bleibt.

Die Einschränkung des Pirani-Rohrs begründet sich auf den verschiedenen Arten der auftretenden Wärmeabgabe. In hohen Druckbereichen dominiert die Konvektion, in mittleren die druckabhängige Wärmeleitung und in niedrigen Druckbereichen aufgrund der stets zunehmenden, mittleren freien Weglänge die Wärmestrahlung.

Es ist technisch gelungen, auch in hohen Druckbereichen eine druckabhängige Wärmeleitung verfügbar zu machen. Deshalb funktioniert das Pirani-Messrohr zwischen diesen hohen Druckbereichen bis hin zum niedrigen Grenzdruck, an dem die druckunabhängige Wärmestrahlung dominiert.

#### **Ionisationsmanometer**

Das Ionisationsmanometer schließt sich nach unten hin an den Messbereich des Wärmeleitungsmanometers an und bietet damit eine zuverlässige Messung in Druckbereichen von  $10^{-2}$  mbar bis ungefähr  $10^{-10}$  mbar. Man unterscheidet, abhängig von der Bauform, Kaltkathoden- und Glühkathodenmanometer. Im Praktikum verwenden wir ein Penning-Manometer, welches zu den Kaltkathoden-Manometern gehört. Daher gehen wir im Folgenden nur auf diese Bauform ein.

Ein Kaltkathodenmanometer besteht in der Regel aus zwei sich im zu untersuchenden Gas befindenden-

den Elektroden, zwischen denen ein hoher Spannungsabfall herrschen soll. Durch das hohe elektrische Feld wird eine kalte Entladung gezündet. Elektronen gehen so in das Gas über und sorgen durch Stoßionisation für die Ausbildung eines Plasmas. Durch geeignete Bauformen erreicht man, dass diese kalte Entladung kontinuierlich erhalten wird.

Die durch Stöße entstehenden freien Ladungsträger gelangen dann zur jeweiligen Elektrode und sorgen so für einen druckabhängigen Entladungsstrom.

## U-Rohr-Manometer

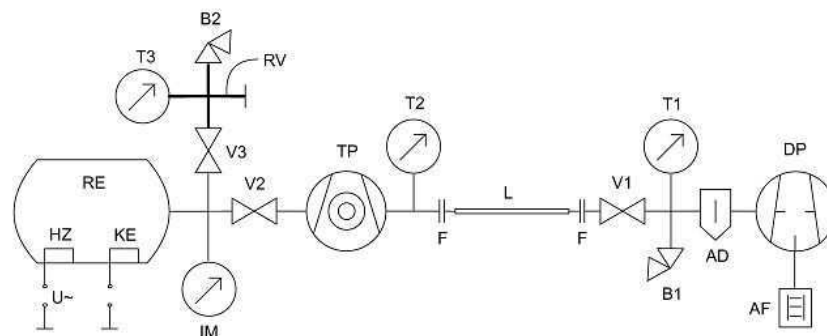
Ein U-Rohr-Manometer ist ein verhältnismäßig einfach herzustellendes Manometer. Man benötigt dafür ein U-förmiges Rohr und eine Flüssigkeit, die mit ausreichender Füllhöhe in das Rohr gefüllt wird. Häufig benutzt man als Flüssigkeit Quecksilber. In der offenen Bauform lassen sich mit dem U-Rohr-Manometer hauptsächlich Druckdifferenzen bestimmen, wenn man eine Öffnung des Manometers in den Rezipienten, die andere hingegen in einen Referenzraum bringt.

Druckunterschiede in beiden Räumen sorgen dann dafür, dass sich die Flüssigkeitssäule im Manometer verschiebt. Eichet man es einmal mit bekannten Drücken, so erhält man auf diese Weise ein einfaches Manometer. Die Druckbereiche dieses Manometers sind prinzipiell durch die Bauform und durch die verwendete Flüssigkeit beschränkt.

Der Dampfdruck von beispielsweise Quecksilber liegt bei Raumtemperatur bei  $p = 2,4 \cdot 10^{-3}$  mbar. Liegt im Rezipienten solch ein niedriger Druck vor, würde spätestens dann das Manometer versagen, da das Quecksilber zu sieden beginnt. In der Praxis dürfte aufgrund bereits vorher einstellender Verdampfung der Arbeitsbereich des U-Rohr-Manometers um ein bis zwei Größenordnungen höher liegen.

## Aufgabe 0: Überblick über die Apparatur

Bevor wir mit den eigentlichen Versuchen anfangen, wollen wir uns zu Beginn erst einmal mit der Apparatur vertraut machen. Wir prüfen zunächst, ob sich die Apparatur fertig vorbereitet unter einem Vorvakuum befindet. Außerdem sollten wir klarstellen, dass die Glasglocke von alten Aufdampfbelägen gereinigt und das Aufdampfschiffchen mit Indium bestückt wurde.



DP Drehschieberpumpe; AF Auspuff-Filter; (AD Adsorptionsfalle); T1, T2, T3 Wärmeleitvakuummeter (Thermovac-Meßsonde); B1, B2 Belüftungsventil; V1, V2, V3 Vakuumventil; L austauschbare Verbindungsleitung; TP Turbomolekularpumpe (TURBOVAC); IM Ionisationsvakuummeter (Penning-Transmitter); RE Rezipient; RV Referenzvolumen; HZ wechselstrombeheiztes Verdampferschiffchen; KE mit Hochspannung versorgte Kugelelektroden.

Nach dieser kurzen Überprüfung können wir die Apparatur selbst, deren Aufbau oben skizziert ist, näher betrachten. Vor allem sollten wir dabei gut die einzelnen Zu- und Ableitungen studieren und die von uns

verwendeten Bauteile lokalisieren.

## Aufgabe 1: Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck

Ziel der ersten Versuchsaufgabe ist die Beobachtung und Beschreibung der Gasentladung in Abhängigkeit des vorherrschenden Gasdrucks. Dazu werden wir sowohl den Rezipienten wie auch die Gasentladungsröhre gemeinsam mit Hilfe einer Drehschieberpumpe evakuieren. Das Hochspannungsgerät bleibt stets eingeschaltet, die Turbomolekularpumpe kommt jedoch erst in den nachfolgenden Versuchen zum Einsatz. Im Versuch werden wir die Evakuierung kontinuierlich durchführen und die sichtbaren Phänomene der Gasentladung beschreiben.

Es ist dabei zu erwarten, dass zu Beginn, wenn im Gas ein noch relativ hoher Druck vorherrscht, keinerlei Gasentladungen sichtbar sein werden. Die mittlere freie Weglänge der Elektronen, also die durchschnittliche Weglänge, die die Elektronen im Gas zurücklegen, ohne mit Gasteilchen zu wechselwirken, ist hier sehr gering. Die Elektronen können aufgrund der häufigen Stöße nicht genügend Energie aufnehmen, um bei einem Stoß durch Stoßionisation soviel Energie auf ein Gasteilchen zu übertragen, um dieses zum Leuchten anzuregen.

Mit abnehmendem Druck nimmt die mittlere freie Weglänge zu, sodass wir erwarten, dass dann vom hinteren Ende der Gasentladungsröhre ausgehend leuchtendes Gas wahrnehmbar sein wird. Wird der Druck so weit erniedrigt, dass die Gasentladung erlischt, dann gibt es im Mittel zu wenig Gasteilchen, mit denen die Elektronen noch stoßen, sodass das Leuchten nicht mehr wahrnehmbar sein wird.

Für alle nachfolgenden Versuche bleibt das Ventil V2 zur Gasentladungsröhre dann geschlossen, sodass diese vom restlichen System abgetrennt ist. Dies dürfte vor allem den Grund haben, dass eventuell in der Gasentladungsröhre vorhandene, undichte Stellen den weiteren Versuchsverlauf nicht stören.

## Aufgabe 2: Leitwert eines Metallrohrs

In dieser Aufgabe wollen wir den Strömungsleitwert  $G$  eines Metallrohres bestimmen. Ganz allgemein ergibt sich dieser, wenn wir den  $pV$ -Durchfluss  $q_{pV}$  durch ein beliebiges Leitungselement, wie beispielsweise hier das Metallrohr, betrachten:

$$q_{pV} = G(p_2 - p_1) = G \cdot \Delta p \quad (3)$$

Der Strömungsleitwert ist hier also als Proportionalitätskonstante zwischen dem  $pV$ -Durchfluss  $q_{pV}$  und der Druckdifferenz  $\Delta p$  gewählt. Dabei sind die auftretenden Drücke  $p_i$  die Drücke am Aus- respektive Eingang des Metallrohrs an den Messstellen  $T_i$ .

Es ist zu erwarten, dass wir den  $pV$ -Durchfluss, welcher auch der Saugleistung der Pumpe entspricht, nicht direkt im Versuch bestimmen werden können. Es soll daher noch eine weitere Möglichkeit aufgezeigt werden, den Leitwert des Metallrohrs zu bestimmen. Dazu führen wir das Saugvermögen  $S$  der Pumpe mit

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

ein, welches dem Volumenfluss der Pumpe durch die Ansaugöffnung entspricht. Bei konstanter Pumpleistung ergibt sich das Saugvermögen im Allgemeinen zu:

$$S = \frac{q_{pV}}{p} \quad (5)$$

Die Saugleistung am anderen Ende der Leitung ist im Allgemeinen von der der Pumpe verschieden, denn das Metallrohr besitzt einen gewissen Leitwert. Wir führen deshalb noch das Saugvermögen  $S_{\text{eff}}$  ein, welches das effektive Saugvermögen beschreibt, das auf das zu evakuierende Gefäß wirkt. Dort herrsche der Druck  $p_2$  vor. Das Saugvermögen ist dann:

$$S_{\text{eff}} = \frac{q_{pV}}{p_2} \quad (6)$$

Der  $pV$ -Durchfluss ist überall stets konstant, sodass wir Gleichung (5) an der Pumpe betrachten können, wo ein Druck von  $p_1$  vorliegt:

$$q_{pV} = p_1 \cdot S \stackrel{(3)}{=} G(p_2 - p_1) \quad (7)$$

Nach dem Leitwert umgeformt ergibt sich, unter Berücksichtigung von (6) und (7):

$$G = S \cdot \frac{p_1}{p_2 - p_1} = \frac{S \cdot S_{\text{eff}}}{S - S_{\text{eff}}} = \left( \frac{1}{S_{\text{eff}}} - \frac{1}{S} \right)^{-1} \quad (8)$$

Die Saugvermögen  $S$  und  $S_{\text{eff}}$  können wir über Messungen bestimmen. Dazu betrachten wir noch einmal die oben eingeführte Definition des Saugvermögens, welche uns eine einfache Differentialgleichung liefert:

$$\begin{aligned} S \stackrel{(4)}{=} \frac{dV}{dt} \stackrel{(3)}{=} \frac{d}{dt} \frac{nRT}{p} &= -\frac{nRT}{p^2} \cdot \dot{p} \stackrel{(1)}{=} -V \cdot \frac{\dot{p}}{p} \\ \Leftrightarrow \frac{S}{V} &= -\frac{\dot{p}}{p} = -\frac{1}{p} \frac{dp'}{dt'} \\ \Leftrightarrow \frac{S}{V} dt' &= -\frac{dp'}{p'} \end{aligned}$$

Wählt man o.B.d.A. die Anfangszeit  $t_0$  der Beobachtung zu  $t_0 = 0$ , so erhält man aus dieser Differentialgleichung durch beidseitige Integration:

$$\begin{aligned} \int_0^t dt' \frac{S}{V} &= \int_{p_0}^p dp' \frac{1}{p'} \\ \Rightarrow t \cdot \frac{S}{V} &= -(\ln p - \ln p_0) \end{aligned}$$

Umgeformt erhalten wir eine Bestimmungsgleichung für die Saugvermögen:

$$\ln p = -\frac{S}{V} \cdot t + \ln p_0 = m \cdot t + c$$

Im Versuch werden wir zunächst die Verbindungsgleitung  $L$  gegen das Metallrohr mit einem Innendurchmesser  $d$  von  $d \approx 2$  mm austauschen. Anschließend messen wir den Druckverlauf  $p(t)$  an den Messpunkten  $T1$  und  $T2$  vor respektive nach dem Rohr und tragen  $\ln p$  über  $t$  auf. Eine lineare Regression liefert uns so die Steigung  $m = -\frac{S}{V}$ , die oben eingeführt wurde. Daraus können wir dann die Saugvermögen  $S$  für  $p_1$  bzw.  $S_{\text{eff}}$  für  $p_2$  bestimmen.

Dazu ist noch eine Kenntnis über die vorhandenen Volumina notwendig. Bezeichnen  $d$  den Durchmesser sowie  $l$  die Länge des verwendeten Rohres, dann ergibt sich das Gesamtvolumen im Allgemeinen zu

$$V = V_{\text{rez}} + V_{\text{rohr}} = V_{\text{rez}} + \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l$$

wenn  $V_{\text{rohr}}$  das Volumen des zu untersuchenden Rohres und  $V_{\text{rez}}$  das Volumen des Rezipienten darstellt. Da letzteres von der von uns verwendeten Apparatur abhängt, ist dies die allgemeinste Aussage, die wir im Vorfeld über die Volumina treffen können.

Mit den so bestimmten Saugvermögen können wir über Gleichung (8) schließlich den Leitwert des Metallrohrs bestimmen. Der so gefundene, experimentelle Wert lässt sich am Ende dann noch mit der aus der Vorbereitungshilfe gegebenen Knudsen-Gleichung vergleichen. Diese gibt den theoretischen Leitwert  $G_{\text{theor}}$  mit  $[G_{\text{theor}}] = \frac{l}{s}$  für eine gerade, nicht zu kurze Rohrleitung der Länge  $l$  und des Durchmessers  $d$  bei Raumtemperatur an:

$$G_{\text{theor}} = 135 \frac{d^4}{l} \bar{p} + 12,1 \frac{d^3}{l} \cdot \frac{1 + 192 \cdot d \cdot \bar{p}}{1 + 237 \cdot d \cdot \bar{p}} / \text{s}$$

Dabei gilt als Abkürzung  $\bar{p} = \frac{1}{2} (p_1 + p_2)$  mit  $[\bar{p}] = [p_i] = \text{mbar}$  sowie in der Formel  $[l] = [d] = \text{cm}$ .

## Aufgabe 3: Saugvermögen Drehschieberpumpe

Ziel dieser Aufgabe ist es nun, das druckabhängige Saugvermögen  $S(p)$  der verwendeten Drehschieberpumpe zu untersuchen. Wir tauschen das Metallrohr der Verbindungsleitung  $L$  wieder mit dem Metall-Wellschlauch.

Anschließend werden wir die Apparatur wieder mit Hilfe der Drehschieberpumpe evakuieren und dabei den zeitlichen Verlauf  $p(t)$  des Drucks am Saugstutzen der Drehschieberpumpe mit Hilfe der Thermovac-Messsonde  $T1$  sowie einer Stoppuhr aufnehmen. Anfangs wählen wir dabei unser Messintervall  $\Delta t$  so kurz wie nur möglich, später bei konstanten  $\Delta t = 15 \text{ s}$ .

Die Herleitung des Versuchs ist analog zu Aufgabe 2, es sollen daher nur nochmal kurz die notwendigen Formeln dargestellt werden. Das Gesamtvolumen  $V$  der Betrachtung ergibt sich wieder zu

$$V = V_{\text{rez}} + V_{\text{schlauch}} = V_{\text{rez}} + \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l$$

wobei  $V_{\text{schlauch}}$  nun das Volumen des Metall-Wellschlauchs bezeichne. Wir tragen  $\ln p(t)$  über  $t$  auf und erhalten mit Hilfe einer linearen Regression die Steigung  $m$ , die uns wegen

$$\ln p = -\frac{S}{V} \cdot t + \ln p_0 = m \cdot t + c$$

das druckabhängige Saugvermögen  $S(p)$  über  $m = -\frac{S(p)}{V}$  liefert. Es ist dabei anzunehmen, dass das Saugvermögen nun wesentlich größer als in Aufgabe 2 ausfallen müsste, da anstatt eines dünnen Metallrohrs nun der dickere Metall-Wellschlauch verwendet wird.

Da wir außerdem  $S(p)$  über  $p$  auftragen sollen, können wir obige Gleichung erneut umstellen zu

$$S(p) = -V \cdot \ln \left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \frac{1}{t}$$

## Aufgabe 4: Saugvermögen Turbomolekularpumpe

In dieser Aufgabe wollen wir nun, analog zu wahlweise Aufgabe 2 oder 3, das Saugvermögen einer Turbomolekularpumpe bestimmen. Es ist dabei darauf zu beachten, dass die Pumpe bis zur vollen Saugleistung eine Anlaufzeit  $\tau = 60$  s benötigt. Wir wollen deshalb im Versuch die Apparatur auf einen Druck von  $p = 0,2$  mbar teilbetlüften. Anschließend evakuieren wir die Apparatur erneut mit der Drehschieberpumpe und schalten ab einem Druck von  $p \approx 0,08$  mbar die Turbomolekularpumpe ein.

Als Messintervall nutzen wir einen Zeitabschnitt von  $\Delta t = 10$  s. Die benötigten Formeln sind dieselben wie in Aufgabe 2 respektive 3. Wir werden hier den Druckverlauf  $p(t)$  an der Ionivac-Messröhre aufnehmen und  $\ln p(t)$  über  $t$  auftragen. Eine lineare Regression liefert uns so wieder das Saugvermögen  $S$  der Turbomolekularpumpe. Alternativ könnten wir auch wieder  $S(p)$  über  $p$  auftragen.

Zuletzt soll noch die Kraft betrachtet werden, mit der die Glasglocke auf die Gummidichtung gedrückt wird. Da der Druck  $p_i$  innerhalb der Glasglocke im Vergleich zum Außendruck  $p_a \approx 10^5$  Pa vernachlässigbar gering ist, gilt mit  $\Delta p = p_a - p_i$  für diese Kraft:

$$F = \Delta p \cdot A \approx p_a \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 10^5 \text{ Pa} \cdot \left(\frac{0,22 \text{ m}}{2}\right)^2 \\ \approx 3,8 \text{ kN}$$

## Aufgabe 5: Statisches Kalibrierungsverfahren

Ziel der nächsten Aufgabe ist es, ein einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren durchzuführen. Dazu schließen wir zunächst das Ventil V3 und evakuieren den Rezipienten mit der Drehschieber- sowie mit der Turbomolekularpumpe. Sobald der Druck im Rezipienten unter  $p = 10^{-4}$  mbar fällt, werden wir das Ventil V2 schließen und dadurch den Rezipienten vom Rest der Apparatur trennen.

Nach Ausschalten beider Pumpen öffnen wir das Ventil V3 wieder und beobachten den sich einstellenden Gesamtdruck an T3. Dann schließen wir das Ventil V3 erneut, öffnen das Ventil B2 und sorgen so dafür, dass sich im Referenzvolumen RV wieder Atmosphärendruck einstellt. Dann schließen wir B2 wieder und öffnen V3 et cetera.

Wir wiederholen diese iterative isotherme Expansion solange, bis sich im Rezipienten ein Druck von  $p \approx 80$  mbar einstellt. Zu Beginn liege im Rezipienten der Druck  $p_{\text{rez},0}$  vor. Nach dem Boyle-Mariotteschen Gesetz (2) findet man bei Betrachtung des Referenzvolumens und des gesamten Systems aus Referenzvolumen und Rezipienten folgendes Gesetz:

$$\frac{p_{\text{atm}}}{p_{\text{ges}}} = \frac{V_{\text{ref}} + V_{\text{rez}}}{V_{\text{ref}}}$$

Dabei bezeichnen  $p_{\text{atm}}$  den Atmosphärendruck im Referenzvolumen bei geschlossenem Ventil V3 und  $p_{\text{ges}}$  den Gesamtdruck im System sowie  $V_{\text{ref}}$  das Referenz- und  $V_{\text{rez}}$  das Rezipientenvolumen. Da  $V_{\text{rez}} \gg V_{\text{ref}}$  gilt, ist näherungsweise  $V_{\text{ref}} + V_{\text{rez}} \approx V_{\text{rez}}$ .

Der Druckzuwachs  $\Delta p$  pro Iterationsschritt  $k$  ist somit

$$\Delta p \approx p_{\text{ges}} \approx p_{\text{atm}} \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{rez}}}$$

Damit ist der Gesamtdruck nach dem  $k$ -ten Iterationsschritt:

$$p_k = p_{\text{rez},0} + p_{\text{atm}} \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{rez}}} \cdot k = p_{\text{rez},0} + m_1 \cdot k \quad (9)$$

Wir werden im Versuch den Gesamtdruck pro Iterationsschritt messen und erwarten gemäß obiger Formel einen linearen Zusammenhang. Durch diese Messung könnten wir auch das Referenzvolumen bestimmen, und damit die Literaturangabe überprüfen. Dazu können wir eine lineare Regression an die Messwerte des Drucks über den Iterationsschritten durchführen, denn dadurch erhalten wir die Steigung  $m_1$  der Ausgleichsgeraden, die über

$$m_1 = p_{\text{atm}} \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{V_{\text{rez}}} \Leftrightarrow V_{\text{ref}} = \frac{m_1 \cdot V_{\text{rez}}}{p_{\text{atm}}}$$

eine Bestimmung des Referenzvolumens bei bekanntem Rezipientenvolumen erlaubt. Alternativ könnte man auch eine Stoffmengenbetrachtung heranziehen. Man kann Gleichung (9) mit Hilfe des idealen Gasgesetzes auf die Stoffmengen umwälzen, wenn man  $n_0$  als Anfangsstoffmenge annimmt. Die Gleichung wird dann zu:

$$n_k = n_0 + p_{\text{atm}} \cdot \frac{V_{\text{ref}}}{R \cdot T} \cdot k = p_{\text{rez},0} + m_2 \cdot k$$

Rechnet man nun die Messwerte des Drucks gemäß

$$n_k = \frac{p_k \cdot V_{\text{ges}}}{R \cdot T}$$

auf die Stoffmengen um, kann man so wieder eine lineare Regression durchführen, um die Steigung  $m_2$  zu bestimmen. Das Referenzvolumen wäre dann gegeben durch

$$V_{\text{ref}} = \frac{m_2 \cdot R \cdot T}{p_{\text{atm}}}$$

Formal ergeben sich auf beiden Wegen dieselben Ergebnisse. Es wird sich im Versuchsablauf herausstellen, welcher Weg der zweckmäßigste sein wird.

## Aufgabe 6: Durchschlagfestigkeit im Vakuum

Im vorletzten Versuchsteil wollen wir die elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum untersuchen. Als Durchschlagfestigkeit eines Isolators, wie in diesem Falle des Vakuums, bezeichnet man im Allgemeinen die elektrische Feldstärke, die im Material höchstens vorhanden sein darf, bevor es zu einem Spannungsdurchschlag, also zur Ausbildung eines Lichtbogens, kommt. In erster Linie kann man auch die notwendige Spannung selbst betrachten, da diese proportional zur elektrischen Feldstärke ist.

Im Versuch werden wir zunächst bei vorherrschendem Atmosphärendruck von  $p = 1000$  mbar die Spannung zwischen zwei Metallkugeln so lange erhöhen, bis ein Spannungsüberschlag aufzeigt. Anschließend halbieren wir mit der Drehschieberpumpe den Druck, erhöhen die Spannung wieder, bis die Durchschlagsspannung erreicht ist et cetera. Um den Druck möglichst konstant zu halten, schließen wir nach Erreichen des benötigten Drucks stets das Ventil V1.

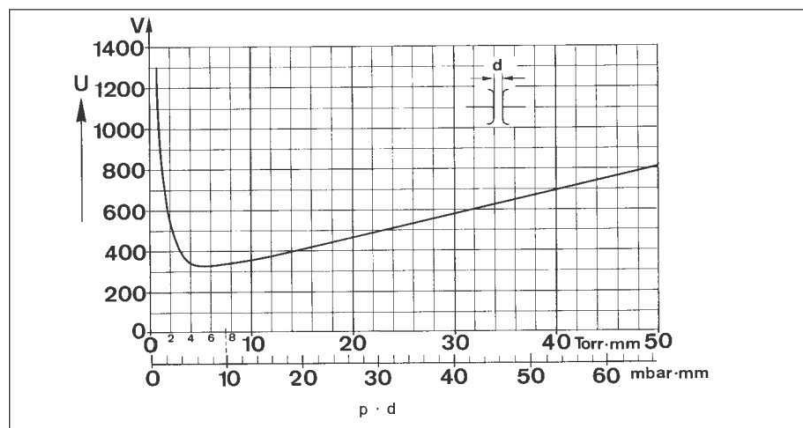
Wir werden dies im Versuch so lange durchführen, bis wir einen Druck von etwa  $p = 0,05$  mbar erreichen. Von dort an nutzen wir anstatt der Drehschieberpumpe nun die Turbomolekularpumpe, um noch schneller noch höhere Vakua zu erreichen. Wir werden bis zu einem Druck von etwa  $p = 2 \cdot 10^{-4}$  mbar



ohne Unterbrechung evakuieren, die Pumpe dann ausschalten und das Ventil V2 schließen.

In diesem Druckbereich wird es sehr schwierig werden, den Druck konstant zu halten, da sich bereits kleinste Lecks in der Apparatur deutlich in Form von Druckschwankungen bemerkbar machen werden. So wird der Druck nach Erreichen des oben genannten Wertes von alleine wieder ansteigen, was wir uns aber für weitere Messungen zunutze machen können. Wir nehmen, sobald es uns in einem Spannungsbereich von  $U \leq 9 \text{ kV}$  möglich ist, weitere Messwerte auf, bis der Druck wieder  $p = 0,05 \text{ mbar}$  erreicht hat.

Wir erwarten, dass sich im Versuch, abhängig von dem vorherrschenden Druck, mindestens zwei unterschiedliche Arten des Funkenüberschlags, und damit der Gasentladung, zeigen werden. Bei relativ hohen Drücken im Bereich um den Atmosphärendruck ist damit zu rechnen, dass sich deutlich erkennbare Lichtbögen ausbilden werden. Mit sinkendem Druck werden sich dann zunehmend nur noch Glimmentladungen zeigen.



Es ist außerdem zu erwarten, dass sich für die Überschlagespannung ein Minimum in einem mittleren Druckbereich von etwa  $p \in (1 \text{ mbar}, 10 \text{ mbar})$  ergeben dürfte. Obiges Schaubildung gibt die Durchschlagsspannung  $U$  in Abhängigkeit des vorherrschenden Drucks bei parallelen Platten an. Das Minimum ist deutlich zu erkennen.

In diesem Druckbereich wird die mittlere freie Weglänge dann ungefähr mit dem Abstand der Kugeln zusammenfallen. Dadurch ergibt sich für das noch vorhandene Gas ein optimales Verhältnis zwischen dem freiem Weg, ohne durch Stoßionisation zu viel Energie an andere Teilchen zu verlieren auf der einen und dem Vorhandensein von genügend Gas zur eigentlichen Gasentladung auf der anderen Seite. Dies kann gut mit Aufgabe 1 verglichen werden.

Diese Voraussagen, sollten sie sich im Versuch bewahrheiten, haben auch Folgen für die Industrie. Durch das erwartete Minimum der Durchschlagspannung in niedrigen Druckbereichen zeigt sich, dass eine Gasentladung in Bereichen niedrigeren Umgebungsdrucks, wie beispielsweise im Flugzeug oder auf Bergen und in großen Höhen, zunehmend wahrscheinlicher wird. Diese Tatsache muss bei der Entwicklung technischer Geräte stets berücksichtigt werden, um ungewollte Gasentladungen und damit eine Zerstörung des Produkts oder eine Gefährdung der Umwelt zu vermeiden.

## Aufgabe 7: Aufdampfen einer Indium-Schicht

Als abschließende Aufgabe wollen wir noch eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Vakuumtechnik kennen lernen. Wir wollen dabei bei verschiedenen Drücken eine Indium-Schicht durch eine Kreisblende auf eine Plexiglasscheibe aufdampfen. Dazu stellen wir Drücke in Bereichen von  $p \leq 10^{-5}$  mbar,  $p \approx 10^{-3}$  mbar sowie  $p \approx 10^{-2}$  mbar ein.

Sobald das jeweilige Sollvakuum erreicht ist, werden wir die Stromstärke der Heizleitung vorsichtig erhöhen, bis das sich auf dem Tantal-Verdampferschiffchen befindliche Indium zu sieden beginnt. Es wird dann auf der kälteren Plexiglasscheibe kondensieren.

Im Versuch werden wir den Heizstrom sowie die Randschärfe in Abhängigkeit des vorherrschenden Drucks beobachten. Es ist dabei zu erwarten, dass die Stromstärke bei niedrigen Drücken geringer sein sollte, denn die Phasenübergangstemperaturen vieler Metalle sinken im Allgemeinen bei abnehmendem Umgebungsdruck. Außerdem erwarten wir, dass die Randschärfe der Indium-Kreise mit abnehmendem Druck zunehmen wird, da dann eine größere mittlere freie Weglänge vorliegt und die Indium-Atome auf dem Weg zum Plexiglas an weniger Gasteilchen streuen können.

Im Versuch ist unbedingt darauf zu achten, den Strom vorsichtig zu erhöhen, damit das Tantal-Verdampferschiffchen nicht schmilzt und damit vollständig zerstört würde.

## Aufgabe 8: Zurücksetzen der Apparatur

Damit auch nachfolgende Gruppen gut an der Apparatur experimentieren können, werden wir sie wieder auf den Anfangszustand zurücksetzen. Dabei werden wir die Apparatur zunächst belüften und die Plexiglasscheibe sowie die Glasglocke von den Aufdampfbelägen befreien. Außerdem bestücken wir das Aufdampfschiffchen wieder mit der richtigen, vom Betreuer zugewiesenen Menge Indium. Die Glasglocke wird dann wieder auf die Dichtung gesetzt und mit Hilfe der Drehschieberpumpe wird ein Vorvakuum erzeugt.

## Quellenverzeichnis

Meschede, D.: Gerthsen Physik

Walcher, W.: Praktikum der Physik

Umrath, Adam, Bolz et alii: Grundlagen der Vakuumtechnik

Wert der universellen Gaskonstante  $R$ :

<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?r>

Dampfdruck von Quecksilber:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Quecksilber#Dampfdruck>

Skizze der Drehschieberpumpe:

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Rotary\\_vane\\_pump.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Rotary_vane_pump.svg)

Skizze der Turbomolekularpumpe:

[http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/\[...\]/2\\_2\\_2\\_turbop/turbo\\_ms5bi0202.gif](http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/[...]/2_2_2_turbop/turbo_ms5bi0202.gif)

Skizze der Versuchsapparatur:

Aufgabenblatt zum Versuch P2-41,42,44 Vakuum

Schaubild zur Durchschlagspannung:

Umrat, Adam, Bolz et alii: Grundlagen der Vakuumtechnik

# **Physikalisches Anfängerpraktikum P2**

**Versuch:  
P2-42  
Vakuum**

Messprotokoll

von

Georg Fleig (georg@leech.it)  
Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:  
19.06.2012

**Aufgabe 1:**

Nummer der Apparatur:

42

**Beobachtungen:**

13,8mbar	Erstes Flackern
2,6mbar	Halbe Röhre leuchtet
0,18mbar	Ringe bilden sich aus; mit sinkendem Druck wandern die Ringe nach oben
0,05mbar	Ringe werden immer dünner; ein kontinuierliches Leuchten entsteht
0,1mbar	Bei Runterdrehen der Spannung: Ringe bleiben an derselben Stelle; Helligkeit nimmt ab

**Aufgabe 2:**

Lin Reg durch alles

<b>l in m</b>	0,44
<b>d in m</b>	0,002

(Rohrlänge)  
(Rohrdurchmesser)

t in s	p <sub>1</sub> in mbar	ln(p <sub>1</sub> )	p <sub>2</sub> in mbar	ln(p <sub>2</sub> )
0	800,00	6,685	1000,00	6,908
10	221,00	5,398	1000,00	6,908
20	180,00	5,193	1000,00	6,908
30	149,00	5,004	1000,00	6,908
40	120,00	4,787	800,00	6,685
50	102,00	4,625	590,00	6,380
60	83,00	4,419	420,00	6,040
70	64,90	4,173	330,00	5,799
80	51,20	3,936	259,00	5,557
90	41,70	3,731	211,00	5,352
100	33,60	3,515	176,00	5,170
110	27,40	3,311	151,00	5,017
120	22,70	3,122	128,00	4,852
130	18,20	2,901	113,00	4,727
140	15,30	2,728	99,80	4,603
150	12,70	2,542	87,60	4,473
160	10,70	2,370	77,00	4,344
170	9,18	2,217	70,70	4,258
180	7,83	2,058	64,40	4,165
190	6,71	1,904	58,40	4,067
200	5,80	1,758	53,60	3,982
210	5,04	1,617	49,20	3,896
220	4,42	1,486	46,20	3,833
230	3,93	1,369	43,40	3,770
240	3,51	1,256	41,20	3,718
250	3,15	1,147	38,90	3,661
260	2,84	1,044	36,40	3,595
270	2,55	0,936	34,30	3,535
280	2,31	0,837	32,40	3,478
290	2,13	0,756	30,90	3,431
300	1,95	0,668	29,50	3,384

<b>Steigungen:</b>	
<b>m<sub>1</sub> in s<sup>-1</sup></b>	-0,0176
<b>m<sub>2</sub> in s<sup>-1</sup></b>	-0,0129

<b>Volumina:</b>	
<b>V<sub>rez</sub> in l</b>	10,000
<b>V<sub>rohr</sub> in l</b>	0,001
<b>V<sub>ges</sub> in l</b>	10,349

<b>Saugvermögen</b>	0,1 bis 0,3
<b>S in l/s</b>	0,182 (Pumpe)
<b>S<sub>eff</sub> in l/s</b>	0,133 (Rezipient)

<b>Mittelwert p<sub>1</sub></b>	33,6
<b>Mittelwert p<sub>2</sub></b>	176,0

<b>G in l/s</b>	0,500	0,1 bis 0,8
<b>G<sub>theor</sub> in l/s</b>	0,516263249	

**Aufgabe 3:**

<b>l in m</b>	0,44
<b>d in m</b>	0,021

(Rohrlänge)  
(Rohrdurchmesser)

<b>t in s</b>	<b>p in mbar</b>	<b>ln(p)</b>	<b>S in l/s</b>
0	1,00E+03	6,908	0,000
10	9,00E+02	6,802	0,111
20	3,35E+02	5,814	0,574
30	1,36E+02	4,913	0,698
40	6,35E+01	4,151	0,724
50	3,13E+01	3,444	0,727
60	1,50E+01	2,708	0,735
70	7,38E+00	1,999	0,736
80	3,48E+00	1,247	0,743
90	1,87E+00	0,626	0,733
100	9,18E-01	-0,086	0,734
110	5,47E-01	-0,603	0,717
120	3,18E-01	-1,146	0,705
130	2,13E-01	-1,546	0,683
140	1,56E-01	-1,858	0,657
150	1,19E-01	-2,129	0,633
160	9,52E-02	-2,352	0,608
170	7,94E-02	-2,533	0,583
180	6,82E-02	-2,685	0,560
190	6,02E-02	-2,810	0,537
200	5,50E-02	-2,900	0,515
210	5,13E-02	-2,970	0,494
220	4,84E-02	-3,028	0,474
230	4,61E-02	-3,077	0,456
240	4,30E-02	-3,147	0,440
250	4,05E-02	-3,206	0,425
260	3,90E-02	-3,244	0,410
270	3,82E-02	-3,265	0,396
280	3,65E-02	-3,310	0,383
290	3,52E-02	-3,347	0,371
300	3,52E-02	-3,347	0,359

+

+

<b>Steigung:</b>	
<b>m in s<sup>-1</sup></b>	-0,077

<b>Volumina:</b>	
<b>V<sub>rez</sub> in l</b>	10,000
<b>V<sub>rohr</sub> in l</b>	0,000
<b>V<sub>ges</sub> in l</b>	10,500

<b>Saugvermögen</b>	
<b>S in l/s</b>	0,809

**Aufgabe 4:**

<b>l in m</b>	0,44
<b>d in m</b>	0,002

(Rohrlänge)  
(Rohrdurchmesser)

<b>t in s</b>	<b>p in mbar</b>	<b>ln(p)</b>
0	2,64E-04	-8,240
10	2,20E-04	-8,422
20	2,04E-04	-8,497
30	1,95E-04	-8,543
40	1,86E-04	-8,590
50	1,80E-04	-8,623
60	1,74E-04	-8,656
70	1,69E-04	-8,686
80	1,65E-04	-8,710
90	1,62E-04	-8,728
100	1,58E-04	-8,753
110	1,55E-04	-8,772
120	1,52E-04	-8,792
130	1,50E-04	-8,805
140	1,47E-04	-8,825
150	1,45E-04	-8,839
160	1,43E-04	-8,853
170	1,41E-04	-8,867
180	1,39E-04	-8,881
190	1,38E-04	-8,888
200	1,36E-04	-8,903
210	1,34E-04	-8,918
220	1,32E-04	-8,933
230	1,31E-04	-8,940
240	1,30E-04	-8,948
250	1,28E-04	-8,963
260	1,27E-04	-8,971
270	1,25E-04	-8,987
280	1,25E-04	-8,987
290	1,23E-04	-9,003
300	1,22E-04	-9,011

Lin Reg durch erste paar Werte

<b>Steigung:</b>	
<b>m in s<sup>-1</sup></b>	-0,132

<b>Saugvermögen</b>	1,0 bis 1,5
<b>S in l/s</b>	1,386

<b>Volumina:</b>	
<b>V<sub>rez</sub> in l</b>	10,000
<b>V<sub>rohr</sub> in l</b>	0,000
<b>V<sub>ges</sub> in l</b>	10,500



**Aufgabe 5:**

<b>k</b>	<b>p<sub>k</sub> in mbar</b>	<b>n<sub>k</sub> in mol</b>
0	1,0E-03	0,0000
1	3,8	0,0153
2	7,2	0,0294
3	10,5	0,0428
4	14,2	0,0579
5	17,9	0,0730
6	21,3	0,0868
7	25,1	0,1023
8	28,6	0,1166
9	32,4	0,1321
10	36,4	0,1484
11	40,6	0,1655
12	44,3	0,1806
13	47,4	0,1933
14	51,9	0,2116
15	56,2	0,2291
16	60,0	0,2446
17	65,3	0,2662
18	69,9	0,2850
19	73,4	0,2993
20	77,7	0,3168
21	82,5	0,3364

<b>V<sub>ref</sub> in l</b>	0,034
<b>V<sub>rez</sub> in l</b>	10,000
<b>R in J/(mol*K)</b>	8,3144621
<b>T in K</b>	295
<b>p<sub>atm</sub> in Pa</b>	101325

<b>Steigung:</b>	
<b>m<sub>1</sub> in mbar</b>	4,75
<b>m<sub>2</sub> in mol</b>	0,0020877

<b>V<sub>ref</sub> in l</b>	0,047
<b>V<sub>ref</sub> in l</b>	0,051

(über p)

(über n)



**Aufgabe 7:**

**Beobachtungen:**

Siehe Foto der Flecken.

# **Physikalisches Anfängerpraktikum P2**

**Versuch:  
P2-42  
Vakuum**

Auswertung

von

Georg Fleig (georg@leech.it )  
Marcel Krause (mrrrc@leech.it )

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:  
19.06.12

# Aufgabe 1: Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck

Da der erste Aufgabenteil nur Demonstrationscharakter hat, haben wir ihn zusammen mit den anderen Gruppen an der Apparatur 44 durchgeführt. Wir haben sowohl den Rezipienten als auch eine Gasentladungsröhre mit Hilfe der Drehschieberpumpe evakuiert. An die Entladungsröhre selbst haben wir Hochspannung angelegt.

In relativ hohen Druckbereichen über 20 mbar waren in der Gasentladungsröhre keinerlei Leuchteffekte zu sehen. Die mittlere freie Weglänge ist in diesen Druckbereichen zu gering, daher stoßen die Elektronen relativ häufig elastisch mit den Gasteilchen und können durch die Beschleunigungsspannung der Röhre nicht genügend kinetische Energie aufnehmen, um inelastische Stöße auszuführen.

Ab einem Druck von etwa 13,8 mbar war an der Kathode ein erstes, leichtes Flackern zu sehen, welches ab 2,6 mbar in ein kontinuierliches, zur Mitte der Röhre hin abnehmendes Leuchten überging. Die Farbe der Gasentladung war bläulich-violett, welches die charakteristische Farbe für niedrige Anregungen des in der Umgebungsluft enthaltenen Stickstoffs ist. Das nachfolgende Bild zeigt dieses Leuchten auf.



Bei weiterer Evakuierung der Gasentladungsröhre zeigten sich ab einem Druck von 0,18 mbar plötzlich statt des kontinuierlichen Leuchtens einige leuchtende, äquidistante Ringe. Die von der Kathode losgelösten und beschleunigten Elektronen treffen nach kurzer Weglänge auf ein Gasatom und regen dieses an. Anschließend wird das Elektron durch die Spannung der Gasentladungsröhre erneut beschleunigt, regt wieder ein Gasatom an et cetera. Auf diese Weise erhält man in der Gasentladungsröhre Ringe, deren Abstände ein gutes Maß für die mittlere freie Weglänge sind.



Bei stets weiter abnehmendem Druck nimmt die mittlere freie Weglänge immer weiter zu. Wir konnten beobachten, dass sich die Ringe dann auch immer weiter voneinander entfernten, sie wanderten sozusagen die Gasentladungsröhre entlang. Durch die größere mittlere freie Weglänge legt ein Elektron mit ausreichender kinetischer Energie nun mehr Weg zurück, bis es auf ein Gasatom stößt, welches es anregen kann. Daher sehen wir dies als eine Vergrößerung der Ringabstände.

Letztlich haben wir noch die Spannung an der Gasentladungsröhre herabgesetzt. Es ließ sich gut beobachten, dass dabei die Helligkeit der Ringe abnahm. Durch die niedrigere Spannung werden an der Kathode weniger Elektronen ausgelöst. Da aber die Anzahl der Elektronen ein Maß ist für die Anzahl der durch An- und Abregung der Gasatome frei werdenden Elektronen, verringert sich auch die Leuchtintensität der Gasentladung.

Unterhalb eines Druckbereichs von etwa 0,05 mbar waren keine Ringe mehr zu sehen. Stattdessen konnten wir wieder ein sehr schwaches, kontinuierliches Leuchten beobachten. Wir haben in dieser Aufgabe also qualitativ gut überprüfen können, wie die Gasentladung in Abhängigkeit vom Druck stattfindet.

## Aufgabe 2: Leitwert eines Metallrohrs

In diesem und den nachfolgenden Versuchsreihen haben wir stets Messungen an Apparatur 42 durchgeführt. Wir haben zunächst den Metall-Wellschlauch mit einem Rohr der Länge  $l = 0,44$  m und dem Durchmessers  $d = 2$  mm ersetzt. Anschließend haben wir den Rezipienten mit Hilfe der Drehschieberpumpe evakuiert und dabei nach Absprache mit unserem Betreuer alle 10 Sekunden gleichzeitig den Druck  $p_1$  an  $T_1$  und  $p_2$  an  $T_2$  gemessen. Dabei ergaben sich die nachfolgend dargestellten Messwerte.

t in s	$p_1$ in mbar	$\ln(p_1)$	$p_2$ in mbar	$\ln(p_2)$
0	800,00	6,685	1000,00	6,908
10	221,00	5,398	1000,00	6,908
20	180,00	5,193	1000,00	6,908
30	149,00	5,004	1000,00	6,908
40	120,00	4,787	800,00	6,685
50	102,00	4,625	590,00	6,380
60	83,00	4,419	420,00	6,040
70	64,90	4,173	330,00	5,799
80	51,20	3,936	259,00	5,557
90	41,70	3,731	211,00	5,352
100	33,60	3,515	176,00	5,170
110	27,40	3,311	151,00	5,017
120	22,70	3,122	128,00	4,852
130	18,20	2,901	113,00	4,727
140	15,30	2,728	99,80	4,603
150	12,70	2,542	87,60	4,473
160	10,70	2,370	77,00	4,344
170	9,18	2,217	70,70	4,258
180	7,83	2,058	64,40	4,165
190	6,71	1,904	58,40	4,067
200	5,80	1,758	53,60	3,982
210	5,04	1,617	49,20	3,896
220	4,42	1,486	46,20	3,833
230	3,93	1,369	43,40	3,770
240	3,51	1,256	41,20	3,718
250	3,15	1,147	38,90	3,661
260	2,84	1,044	36,40	3,595
270	2,55	0,936	34,30	3,535
280	2,31	0,837	32,40	3,478
290	2,13	0,756	30,90	3,431
300	1,95	0,668	29,50	3,384

Die Werte wurden von uns in der Tabelle direkt natürlich logarithmiert, da dies nun für die Auswertung benötigt wird. Wir haben in der Vorbereitung hergeleitet, dass das Saugvermögen  $S_i$  mit dem Druck  $p_i$  über die Gleichung

$$\ln p_i = -\frac{S_i}{V} \cdot t + \ln p_0 = m_i \cdot t + c$$

zusammenhängt. Dabei bezeichnet  $V$  das Gesamtvolumen der Apparatur, welches wir im Folgenden kurz diskutieren wollen. Bei der von uns verwendeten Apparatur beträgt das Volumen  $V_{\text{rez}}$  des Rezipienten  $V_{\text{rez}} = 10,0$  l. Nach Angabe auf dem Aufgabenblatt ist das Gesamtvolumen der Apparatur dann  $V_{\text{ges}} = 10,5$  l. Dieses enthält bereits das Volumen  $V_{\text{schlauch}}$  des Metallwellschlauchs, welchen wir aber für diese Aufgabe entfernt haben. Daher müssen wir dessen Volumen von  $V_{\text{ges}}$  abziehen.

Die Länge des Metallwellschlauchs betrug  $l = 0,44$  m, der Durchmesser war zu  $d_{\text{schlauch}} = 21$  mm

gegeben. Das Volumen des Schlauchs beträgt also:

$$V_{\text{schlauch}} = l \cdot \pi \cdot \left( \frac{d_{\text{schlauch}}}{2} \right)^2 = 0,15241$$

Analog berechnet man mit obigen Angaben das Volumen  $V_{\text{rohr}}$  des zu untersuchenden Metallrohrs zu:

$$V_{\text{rohr}} \approx 10^{-3} \text{ l}$$

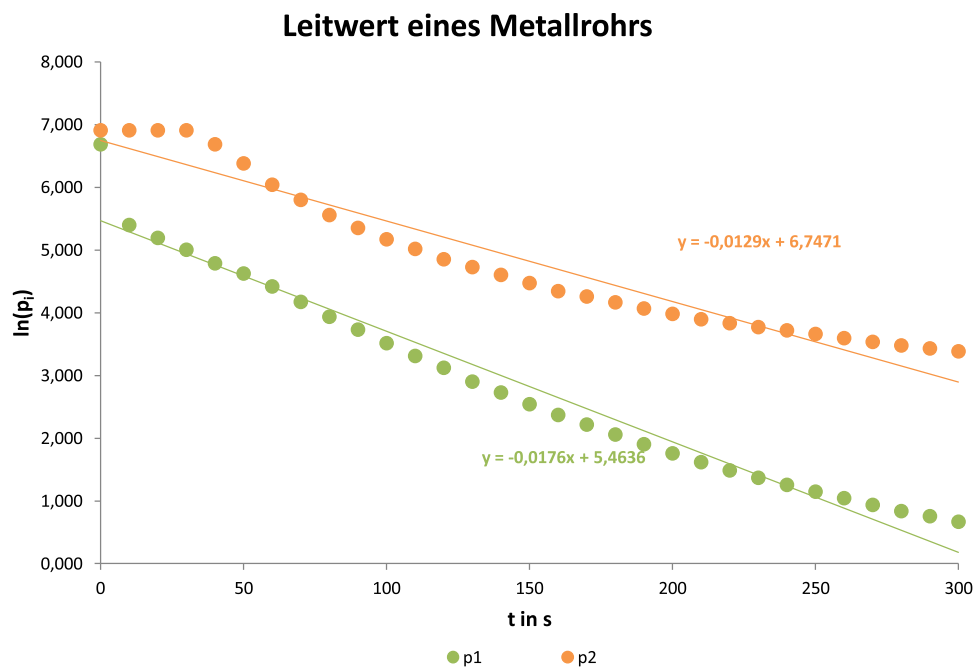
Als Volumen  $V$  erhalten wir somit:

$$V = V_{\text{ges}} + V_{\text{rohr}} - V_{\text{schlauch}} \approx 10,3491$$

Wir tragen nun  $\ln p_i$  über der Zeit  $t$  auf und erhalten durch eine lineare Regression die Steigung  $m_i$ , über die wir mit

$$S_i = -m_i \cdot V$$

auf das Saugvermögen schließen können. Wir nutzen wie in der Vorbereitung vereinbart die Notation  $S_1 = S$  für die Regression über Druck  $p_1$  und  $S_2 = S_{\text{eff}}$  für diejenige über  $p_2$ . Die Auftragung der Messwerte inklusive der linearen Regression sind nachfolgend dargestellt.



Der Verlauf der Messwerte würde es eigentlich zulassen, zwei lineare Regressionen in verschiedenen Zeitbereichen anzusetzen. Es hat sich laut unserem Betreuer allerdings als zweckmäßiger und korrekter erwiesen, die Regression über alle Messwerte hinweg gleichermaßen durchzuführen. Aus dem Schaubild lesen wir die Steigungen

$$m_1 = -0,0176 \text{ s}^{-1}$$

sowie

$$m_2 = -0,0129 \text{ s}^{-1}$$

ab. Über obige Formel erhalten wir so direkt die Saugleistungen

$$S = 0,182 \text{ l/s}$$

und

$$S_{\text{eff}} = 0,133 \text{ l/s}$$

woraus wir nun mit der in der Vorbereitung hergeleiteten Formel

$$G = \left( \frac{1}{S_{\text{eff}}} - \frac{1}{S} \right)^{-1}$$

direkt der experimentell bestimmte Leitwert ergibt:

$$G_{\text{exp}} = 0,494 \text{ l/s}$$

Um zu überprüfen, ob der Leitwert in der richtigen Größenordnung liegt, wollen wir nun noch den theoretischen Leitwert nach der Knudsen-Gleichung

$$G_{\text{theor}} = 135 \frac{d^4}{l} \bar{p} + 12,1 \frac{d^3}{l} \cdot \frac{1 + 192 \cdot d \cdot \bar{p}}{1 + 237 \cdot d \cdot \bar{p}} \text{ l/s}$$

bestimmen. Dabei sind  $\bar{p} = \frac{1}{2} (p_1 + p_2)$  mit  $[\bar{p}] = [p_i] = \text{mbar}$  sowie in der Formel  $[l] = [d] = \text{cm}$ . Wir werten diese Formel am Messwertepaar  $(p_1 ; p_2) = (33,6 ; 176,0)$  mbar bei  $T = 100 \text{ s}$  aus. Wir haben uns für dieses Wertepaar entschieden, da es sich relativ zentral in den möglichst linearen Bereichen der Messwerte befindet. Setzen wir dieses Messwertepaar in obige Formel ein, so erhalten wir:

$$G_{\text{theor}} \approx 0,516 \text{ l/s}$$

Der experimentell ermittelte Leitwert stimmt also im Rahmen der Messgenauigkeit mit dem theoretischen Leitwert überein. Da wir letzteren aber aus einer praktisch willkürlichen Wahl eines Messwertepaares erhalten haben, verzichten wir an dieser Stelle auf eine weitere quantitative Fehlerauswertung. Wir erhalten durch die Knudsen-Formel dennoch eine grobe Vorstellung, dass der von uns ermittelte Wert in der richtigen Größenordnung liegen dürfte.

## Aufgabe 3: Saugvermögen Drehschieberpumpe

Im nächsten Versuchsteil haben wir das Saugvermögen der von uns benutzten Drehschieberpumpe bestimmt. Dazu haben wir den Rezipienten zunächst wieder belüftet und das dünne Metallrohr wieder mit dem Metallwellschlauch ersetzt. Da wir nun wieder den Schlauch als Teil der gesamten Apparatur betrachten, ergibt sich das Gesamtvolumen nun zu:

$$V = 10,5 \text{ l}$$

Nun haben wir die Drehschieberpumpe aktiviert und den Rezipienten erneut evakuiert. Wir haben wieder alle 10 Sekunden den Druck  $p$  notiert, der von der Thermovac-Sonde  $T_1$  gemessen wurde. Dabei ergaben sich die nachfolgend dargestellten Messwerte.



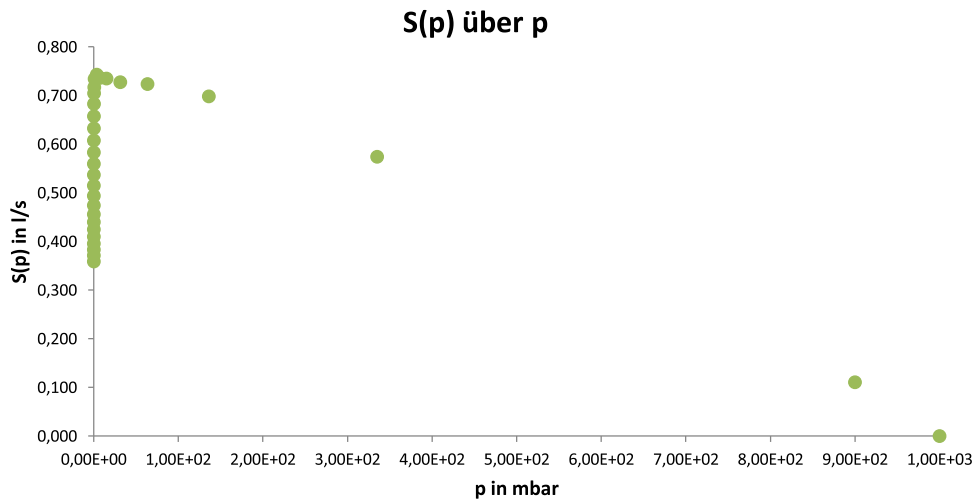
t in s	p in mbar	ln(p)	S in l/s
0	1,00E+03	6,908	0,000
10	9,00E+02	6,802	0,111
20	3,35E+02	5,814	0,574
30	1,36E+02	4,913	0,698
40	6,35E+01	4,151	0,724
50	3,13E+01	3,444	0,727
60	1,50E+01	2,708	0,735
70	7,38E+00	1,999	0,736
80	3,48E+00	1,247	0,743
90	1,87E+00	0,626	0,733
100	9,18E-01	-0,086	0,734
110	5,47E-01	-0,603	0,717
120	3,18E-01	-1,146	0,705
130	2,13E-01	-1,546	0,683
140	1,56E-01	-1,858	0,657
150	1,19E-01	-2,129	0,633
160	9,52E-02	-2,352	0,608
170	7,94E-02	-2,533	0,583
180	6,82E-02	-2,685	0,560
190	6,02E-02	-2,810	0,537
200	5,50E-02	-2,900	0,515
210	5,13E-02	-2,970	0,494
220	4,84E-02	-3,028	0,474
230	4,61E-02	-3,077	0,456
240	4,30E-02	-3,147	0,440
250	4,05E-02	-3,206	0,425
260	3,90E-02	-3,244	0,410
270	3,82E-02	-3,265	0,396
280	3,65E-02	-3,310	0,383
290	3,52E-02	-3,347	0,371
300	3,52E-02	-3,347	0,359

Auch hier haben wir direkt wieder den natürlichen Logarithmus eines jeden Druckwerts bestimmt. Zudem haben für jeden Wert das Saugvermögen  $S$  der Drehschieberpumpe über die in der Vorbereitungshilfe hergeleiteten Formel

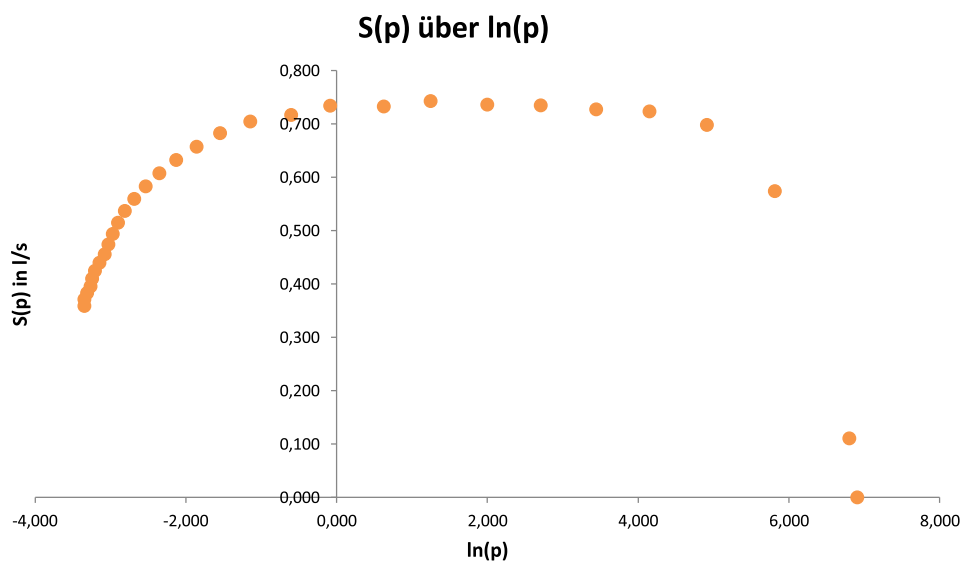
$$S(p) = -V \cdot \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \cdot \frac{1}{t}$$

berechnet. Dabei setzten wir  $p_0 = p(0) = 10^3$  mbar für den Zeitpunkt  $t = 0$  fest. Da die obige Formel an dieser Stelle nicht zwingend konvergiert, setzten wir zweckmäßig den Wert  $S(0) = 0$ . Natürlich ist es klar, dass das Saugvermögen bei kleinen zeitlichen Verschiebungen um  $t = 0$  nicht verschwindet, allerdings ist dies für die weitere Auswertung nicht relevant.

Wir haben nun das Saugvermögen  $S(p)$  über dem Druck  $p$  aufgetragen, wie es auf dem Aufgabenblatt gefordert war, und erhielten das nachfolgende Schaubild.



Da die Drehschieberpumpe bereits nach kurzer Zeit den Druck um einige Größenordnungen verringert hat, erhalten wir so in diesem Schaubild die Mehrzahl der Messwerte in den niedrigen Druckbereichen. Für eine weitere Auswertung bietet es sich mehr an,  $S(p)$  über  $\ln(p)$  aufzutragen. Da der Faktor  $1/p_0$  das Schaubild lediglich auf der  $x$ -Achse verschiebt, können wir diesen bei der Auftragung auch ignorieren. Als Schaubild ergibt sich nun:



Man kann schön erkennen, dass das Saugvermögen in einem Druckbereich  $p \in [0,918 ; 63,500]$  mbar hinreichend konstant ist. Bildet man aus diesen sieben, sich in diesem Bereich befindlichen Messwerte der Saugvermögen das arithmetische Mittel, so kommt man auf:

$$S_{\text{exp}} \approx 0,733 \text{ l/s} = 2,639 \text{ m}^3/\text{h}$$

Als Literaturwert für die Drehschieberpumpe ist auf dem Aufgabenblatt  $S_{\text{lit}} = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$  angegeben, unser Wert hat also eine relative Abweichung von 5,56%. Im Rahmen der Messgenauigkeit konnten wir so also das Saugvermögen der Drehschieberpumpe experimentell bestätigen. Als mögliche Fehlerquellen bei der Messung finden sich neben statistischen Fehlern auch systematische, denn es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es kleinere Lecks in der Apparatur, insbesondere im Metallwellschlauch, gab.

## Aufgabe 4: Saugvermögen Turbomolekularpumpe

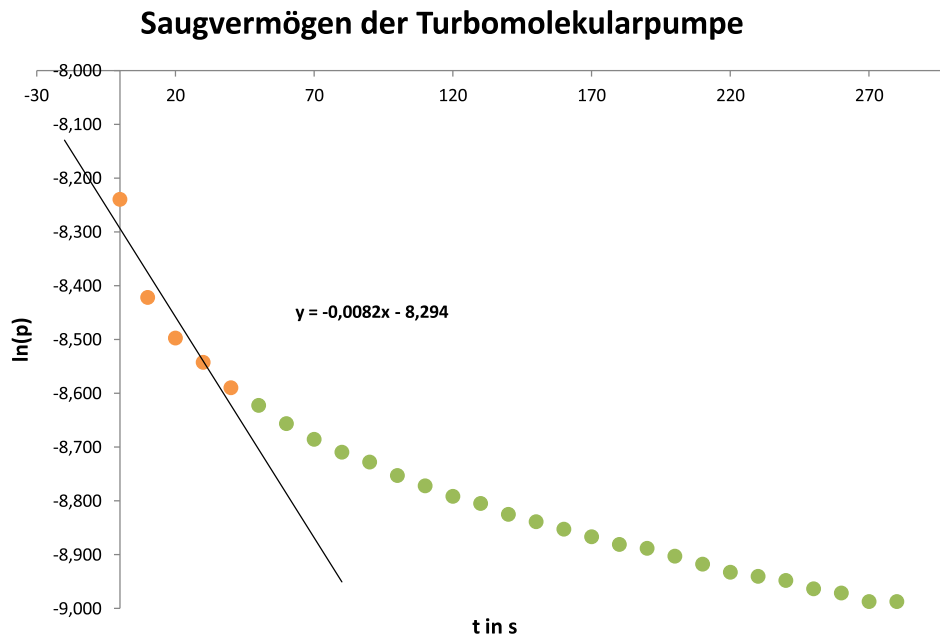
Nachdem wir in Aufgabe 3 den Rezipienten bereits in den mittleren Feinvakuum-Bereich evakuiert haben, haben wir nun zusätzlich zur Drehschieberpumpe die Turbomolekularpumpe eingeschaltet, um deren Saugvermögen zu bestimmen. Nach einer Anlaufzeit der Pumpe von etwa 50s haben wir erneut alle 10 Sekunden den Druck  $p$  an der Ionivac-Sonde (IM) abgelesen. Dabei haben wir die nachfolgend abgedruckten Messwerte erhalten.

t in s	p in mbar	ln(p)
0	2,64E-04	-8,240
10	2,20E-04	-8,422
20	2,04E-04	-8,497
30	1,95E-04	-8,543
40	1,86E-04	-8,590
50	1,80E-04	-8,623
60	1,74E-04	-8,656
70	1,69E-04	-8,686
80	1,65E-04	-8,710
90	1,62E-04	-8,728
100	1,58E-04	-8,753
110	1,55E-04	-8,772
120	1,52E-04	-8,792
130	1,50E-04	-8,805
140	1,47E-04	-8,825
150	1,45E-04	-8,839
160	1,43E-04	-8,853
170	1,41E-04	-8,867
180	1,39E-04	-8,881
190	1,38E-04	-8,888
200	1,36E-04	-8,903
210	1,34E-04	-8,918
220	1,32E-04	-8,933
230	1,31E-04	-8,940
240	1,30E-04	-8,948
250	1,28E-04	-8,963
260	1,27E-04	-8,971
270	1,25E-04	-8,987
280	1,25E-04	-8,987
290	1,23E-04	-9,003
300	1,22E-04	-9,011

Auch hier wurden die Druckwerte direkt wieder natürlich logarithmiert. Zur Auswertung nutzen wir dieselbe Formel wie bei Aufgabe 2:

$$\ln p = -\frac{S}{V} \cdot t + \ln p_0 = m \cdot t + c$$

Da wir an der Apparatur keine weiteren Modifikationen vorgenommen haben, beträgt das Gesamtvolumen wie in Aufgabe 3 wieder  $V = 10,5\text{l}$ . Wir haben erneut  $\ln(p)$  über  $t$  aufgetragen. Der für uns relevante Druckbereich, in dem die Turbomolekularpumpe eine hinreichend konstante Saugleistung aufweist, wird bereits nach wenigen Messungen verlassen. Wir haben uns daher entschieden, die lineare Regression nur durch die ersten fünf Messwerte zu legen.



Dadurch erhalten wir als Steigung der Ausgleichsgeraden den Wert

$$m = -0,0082 \text{ s}^{-1}$$

Mit Hilfe des Gesamtvolumens erhalten wir so analog zu Aufgabe 2 das Saugvermögen der Turbomolekularpumpe zu:

$$S_{\text{exp}} = 8,61 \cdot 10^{-2} \text{ l/s}$$

Auf dem Aufgabenblatt ist der Literaturwert des Saugvermögens der Turbomolekularpumpe gegeben durch:

$$S_{\text{lit}} \geq 30 \text{ l/s}$$

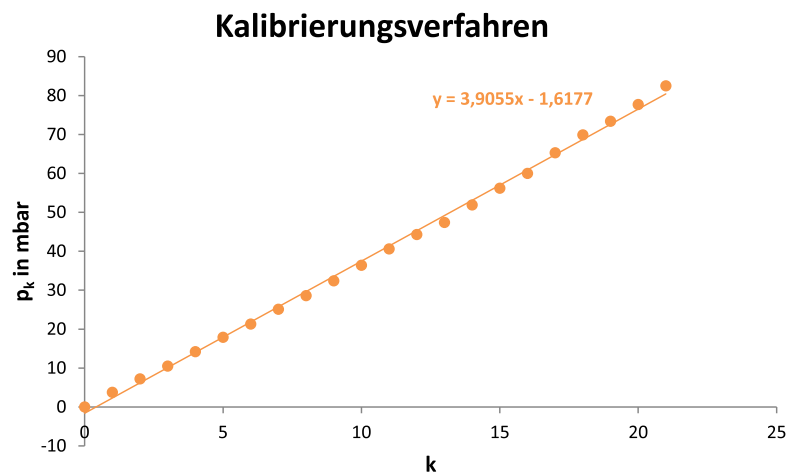
Nehmen wir  $S_{\text{lit}} \approx 30 \text{ l/s}$  an, so erhalten wir als relativen Fehler  $-99,71\%$ . Diese enorme Abweichung zeigt uns auf, dass das von uns durchgeführte Verfahren zur Bestimmung der Saugleistung denkbar ungeeignet ist. Die Gründe hierfür liegen vor allem an dem recht kleinen Rezipienten, den wir verwendet haben. Da die Saugleistung der Turbomolekularpumpe enorm ist, reicht dessen Volumen schlicht nicht aus.

Des Weiteren befanden wir uns in unserer Messung bereits zu Messbeginn am Ende des für die Turbomolekularpumpe relevanten Arbeitsbereichs. Höhere Saugleistungen in größeren Druckbereichen konnten so von uns also nicht registriert werden.

## Aufgabe 5: Statisches Kalibrierungsverfahren

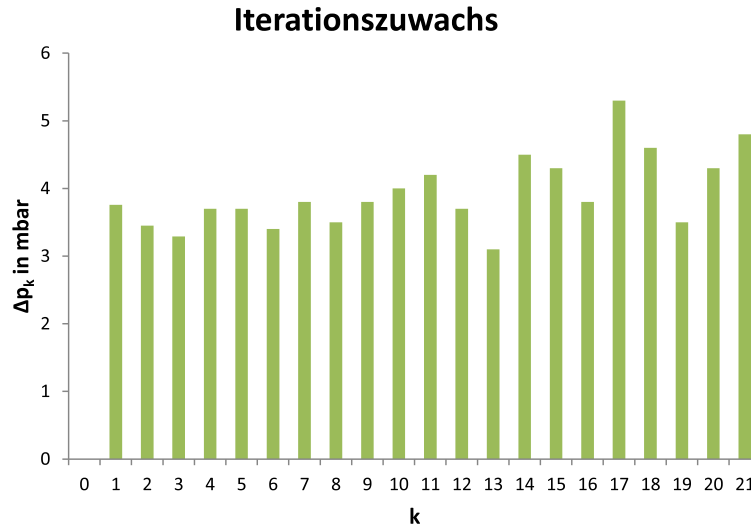
Die Vorgehensweise zur Durchführung des einstufigen, statischen Kalibrierungsverfahrens, sowie die zugehörige Herleitung zur Auswertung wurden bereits in der Vorbereitung ausführlich diskutiert. Ausgehend von einem Gesamtdruck von  $p = 10^{-3} \text{ mbar}$  an T3 wiederholten wir schrittweise die isotherme Expansion bis zu einem Druck von  $p \approx 80 \text{ mbar}$ . Im Folgenden sind die Drücke zu dem jeweiligen Iterationsschritt aufgelistet und graphisch dargestellt.

k	p <sub>k</sub> in mbar	Δp <sub>k</sub> in mbar	ε <sub>exp</sub>
0	1,0E-03	-	-
1	3,8	3,76	266,0
2	7,2	3,45	277,4
3	10,5	3,29	285,7
4	14,2	3,70	281,7
5	17,9	3,70	279,3
6	21,3	3,40	281,7
7	25,1	3,80	278,9
8	28,6	3,50	279,7
9	32,4	3,80	277,8
10	36,4	4,00	274,7
11	40,6	4,20	270,9
12	44,3	3,70	270,9
13	47,4	3,10	274,3
14	51,9	4,50	269,7
15	56,2	4,30	266,9
16	60,0	3,80	266,7
17	65,3	5,30	260,3
18	69,9	4,60	257,5
19	73,4	3,50	258,9
20	77,7	4,30	257,4
21	82,5	4,80	254,5



Der nach Gleichung (9) in der Vorbereitung erwartete lineare Zusammenhang zwischen Gesamtdruck und Iterationsschritt konnte hier sehr gut nachgewiesen werden.

Die Druckzunahme pro Iterationsschritt wurde bereits in obiger Tabelle berechnet und wird nun ebenfalls graphisch dargestellt.



Die Höhe der Balken ist einigermaßen konstant. Die Abweichungen lassen sich durch zeitlich nicht konstante Messabstände erklären. Da die Apparatur nicht leckfrei war, gab es auch ohne die Ausführung der Iteration eine geringe Druckänderung. Je größer der zeitliche Abstand zwischen den Schritten war, desto größer auch die Störung des Messergebnisses durch automatische Belüftung des Systems. Bilden wir den Mittelwert der Druckzunahme pro Iterationsschritt, so erhalten wir

$$\frac{\Delta p}{k} = 3,93 \text{ mbar}$$

Das experimentell gefundene Expansionsverhältnis  $\epsilon_{\text{exp}}$  wurde ebenfalls in der Messwerttabelle oben angegeben, berechnet haben wir es mit Hilfe der folgenden Gleichung:

$$\epsilon_{\text{exp}} = \frac{1000 \text{ mbar } k}{p_k}$$

Durch die Bildung des Mittelwertes erhalten wir:

$$\epsilon_{\text{exp}} = 271$$

Der theoretische Wert lässt sich über die Beziehung

$$\epsilon_{\text{theo},1} = \frac{V_{\text{ges}}}{V_{\text{ref}}} = \frac{V_{\text{rez}}}{V_{\text{ref}}} = \frac{101}{0,0341} = 294$$

berechnen. Die relative Abweichung unseres Messwertes beträgt daher -7,8%. Die Abweichung ist in Anbetracht des schwankenden iterationszuwachses zu erwarten.

Wir können nun außerdem noch das Referenzvolumen  $V_{\text{ref}}$  durch unsere Messung selbst bestimmen. Dazu greifen wir auf die in der Vorbereitung hergeleitete Beziehung

$$V_{\text{ref,exp}} = \frac{m_1 \cdot V_{\text{rez}}}{p_{\text{atm}}}$$

zurück.  $m_1$  bezeichne die Steigung der Regressionsgeraden aus dem ersten Graphen dieser Aufgabe, sie beträgt  $m_1 = 3,9055 \text{ mbar}$ .  $p_{\text{atm}}$  sei der Umgebungsdruck, welcher hier mit  $p_{\text{atm}} = 1013 \text{ bar}$  angenommen wurde. Damit erhalten wir:

$$V_{\text{ref,exp}} = 0,0391$$

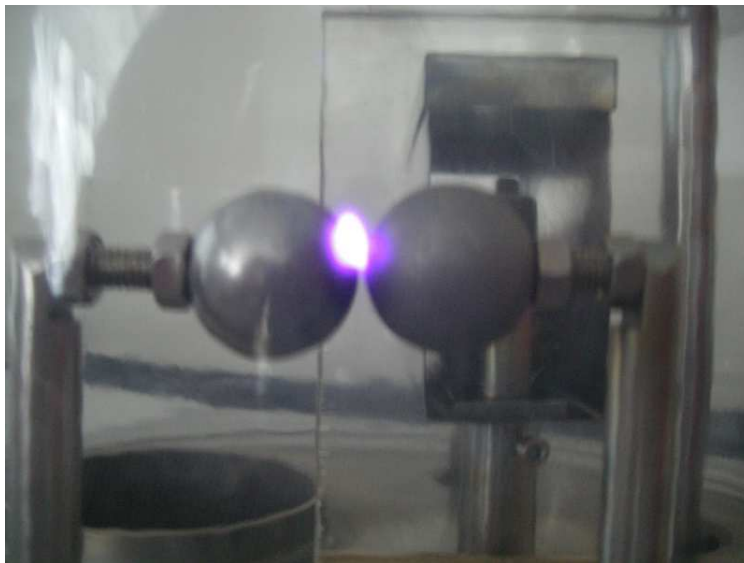
Die Abweichung vom Literaturwert  $V_{\text{ref,lit}} = 0,0341$  beträgt 14,7%. Auch hier nehmen wir als größten Fehler wieder die Leckrate und die damit verbundene Druckänderung ohne eigens durchgeführte Expansion an. Berechnen wir mit diesem Wert  $V_{\text{ref,exp}}$  erneut den theoretischen Wert des Expansionsvermögens, so erhalten wir:

$$\epsilon_{\text{theo},2} = \frac{V_{\text{rez}}}{V_{\text{ref,exp}}} = \frac{101}{0,0391} = 256$$

Der relative Fehler unseres Messwertes wird dadurch geringfügig kleiner, er beträgt nun noch 5,9%. Diese letzte Rechnung wurde nur zum Vergleich durchgeführt, wir gehen davon aus, dass die Angabe von  $V_{\text{ref,theo}}$  in der Versuchsmappe korrekt ist.

## Aufgabe 6: Durchschlagfestigkeit im Vakuum

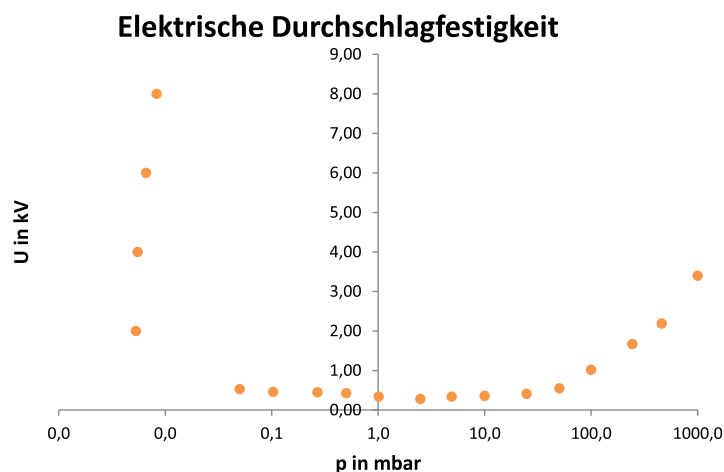
Das Ziel dieser Aufgabe war es, die elektrische Durchschlagfestigkeit im Vakuum bei verschiedenen Drücken zu bestimmen. Im Rezipienten befanden sich zwei Metallkugeln dicht beieinander, welche mit einem Netzgerät verbunden waren. Mit diesem konnten wir hohe Spannungen im Kilovolt-Bereich erzeugen. Bei Atmosphärendruck begannen wir die Spannung an den beiden Kugeln langsam hochzuregeln. Die Durchschlagspannung war dann erreicht, wenn die beobachtete angelegte Spannung am Voltmeter einbrach. Gleichzeitig war bei hohen Drücken eine Bogenentladung in Form eines Funkens zu sehen, bei niedrigen Drücken ein diffuses Glimmen, welches zunächst nur zwischen den Kugeln sichtbar war (siehe Foto), später bei noch niedrigeren Drücken einen großen Teil des Rezipientens füllte.



Wir ermittelten für verschiedene Drücke die benötigte Spannung, ab welcher es zu einer Bogenentladung bzw. Glimmentladung kam. Die Entladung erreichten wir zunächst durch das Einstellen bestimmter Drücke mit der Drehschieberpumpe und Variation der Spannung  $U$  an den Metallkugeln. Später wurde die Turbomolekularpumpe eingesetzt, um noch tiefere Drücke zu erzeugen. Hier wählten wir feste Werte für die Spannungen und warteten, bis durch die automatische Belüftung des Systems der Druck so weit angestiegen war, dass es zu einer Entladung kam. Nachstehend sind unsere Messwerte aufgelistet.

p in mbar	U in kV
1000,0	3,40
460,0	2,19
244,0	1,67
99,9	1,02
50,4	0,55
24,8	0,41
10,0	0,36
4,90	0,34
2,49	0,28
1,01	0,34
0,500	0,43
0,269	0,45
0,103	0,46
0,050	0,53
0,0053	2,0
0,0055	4,0
0,0066	6,0
0,0083	8,0

Das Auftragen von  $p$  über  $U$  liefert folgendes Schaubild:



Wir finden ein deutliches Minimum der Durchschlagspannung im Bereich von  $p \in [0, 1 \text{ mbar}, 10 \text{ mbar}]$  vor. Entgegen der in der Vorbereitung beschriebenen Vermutung entspricht in diesem Bereich die mittlere freie Weglänge nicht zwingend dem Abstand der beiden Kugeln. Viel mehr ist es das günstige Verhältnis der mittleren freien Weglänge und der Teilchendichte, welches die Gasentladung bei geringen Spannungen ermöglicht. Der Anstieg der benötigten Spannung  $U$  bei höheren Drücken lässt sich einfach über die geringe mittlere freie Weglänge zwischen der Elektronen erklären. Die Energie der emittierten Elektronen nimmt mit ihrer zurückgelegten Strecke aufgrund der Beschleunigung durch das elektrische Feld zu. Stoßen die Elektronen jedoch ständig mit den Gasteilchen, so erreichen sie schwerer die Energie, die zur Ionisation der Gasatome nötig ist. Daher werden sehr hohe Spannungen gefordert, um die Elektronen auch auf kurzer Strecke entsprechend zu beschleunigen.

Bei den sehr niedrigen Drücken spielten übrige Raumladungszonen um die Kugeln in die Messung mit ein, wodurch wir verfälschte Ergebnisse erhielten. Eigentlich war zu erwarten, dass die Flanke des Graphen in diesem Bereich auf die andere Seite kippt. Dennoch lässt sich qualitativ erkennen, dass bei sehr geringen Drücken die Durchschlagspannung wieder ansteigt. Begründen lässt sich dies durch die geringe



Teilchendichte, wodurch zu wenig Gasteilchen zu Ionisation zwischen den Kugeln zur Verfügung stehen. Ohne die Ionisation und den damit verbundenen Lawineneffekt kann kein Ladungstransport erfolgen. Die Glimmentladung bei geringen Drücken haben wir bereits im Demonstrationsversuch in Aufgabe 1 beobachtet. Auch hier sorgte eine Erhöhung der Spannung für eine höhere Intensität des emittierten Lichtes. Wegen der kurzen Strecke zwischen den beiden Kugeln konnten wir allerdings nur einen "Ring" beobachten. Die Folgen dieser Ergebnisse für die Industrie wurden bereits in der Vorbereitung erläutert.

## Aufgabe 7: Aufdampfen einer Indium-Schicht

In dieser Aufgabe sollten wir uns mit dem Aufdampfen dünner Beschichtungen im Vakuum beschäftigen. Ein Tantal-Schiffchen, bestückt mit etwas Indium, befand sich eingeschlossen im Rezipienten. An der Oberseite befand sich eine Lochblende, über der eine schwenkbare Plexiglasplatte angebracht war. Mittels eines Netzgerätes konnten wir den Heizstrom variieren, welcher durch das Schiffchen floss. Bei drei verschiedenen Drücken stellten wir diesen so ein, dass das Schiffchen leicht zu glühen begann und sich auf der Plexiglasscheibe ein Fleck abzeichnete. Wir wählten die Drücke  $p \in \{10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}\}$  mbar.



Die Kreise von links nach rechts wurden mit steigendem Druck erzeugt. Damit hat sich die Vorhersage bzgl. der Randschärfe der Flecken bestätigt. Beim niedrigsten Druck erhielten wir den schärfsten Fleck auf der Scheibe. Wie in der Vorbereitung bereits angesprochen wurde, hängt dies mit der steigenden mittleren freien Weglänge und der damit verbundenen reduzierten Streuung zusammen. Auch bei der benötigten Stromstärke zur Beheizung des Tantal-Schiffchens wurden unsere Erwartungen bestätigt. Bei steigendem Druck war eine höhere Heizleistung nötig, um eine Schicht auf dem Plexiglas aufzudampfen.

## Aufgabe 8: Zurücksetzen der Apparatur

Wir stellten den ursprünglichen Zustand des Versuchstisches wieder her und reinigten die Glasglocke sowie die Plexiglasscheibe von den Indium-Verschmutzungen.